

Mikko Annala

LED-lamppujen vaikutukset sähkösuunnitteluun huvipuistoympäristössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

9.3.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Mikko Annala LED-lamppujen vaikutukset sähkösuunnitteluun huvipuisto ympäristössä 47 sivua 9.3.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tapio Kallasjoki Käyttöpäällikkö Marko Tikkanen
<p>Insinöörityössä oli tarkoituksena tutkia Linnanmäellä huvipuistokäytössä olevaa neljää yleisintä LED-lamppua. Mittausten tarkoituksena oli selvittää, millaisia vaikutuksia hyvän hyötysuhteen omaavilla LED-lampuilla oli sähköverkkoon.</p> <p>Mittalaitteina käytettiin oskilloskooppia sekä sähkönlaadun analysaattoria. Suoritetut mittaukset olivat LED-lamppujen käynnistysvirran mittausta, virran käyrämuodon mittausta, sähkötehon mittausta sekä harmonisten yliaaltojen mittaukset.</p> <p>Mittaukset osoittavat, että energiatehokkailla LED-lampuilla on myös sähköverkkoon vaikuttavia haittapuolia. Käynnistysvirtamittauksista ilmeni, että LED-lamppu ottaa monikymmenkertaisen käynnistysvirran normaaliin virtaan verrattuna. Sähkötehojen mittauksesta selvisi, että tehoissa on epäsymmetriaa ja harmonisten yliaaltojen mittauksista ilmeni erityisesti virran sisältävän runsaasti yliaaltoja.</p> <p>Käynnistysvirta ja normaalin käyttövirran mittaustulosten pohjalta pystyttiin laatimaan kuormitustaulukot, jotka helpottavat valaistusryhmien suunnittelua. Kuormitustaulukossa määritettiin johdonsuoja-automaateille suurin kuormitus käynnistysvirran ja käyttövirran mukaan.</p> <p>Mittaukset osoittivat LED-lampuissa olevan suuria määriä harmonisia yliaaltoja ja kuormituksesta johtuvia virran ja jännitteen epälineaarisuuksia. Tämä voi tulevaisuudessa aiheuttaa ongelmia. Huvipuistojen ja suuren määrän LED-valaistusta omaavien kiinteistöjen tulisi panostaa säännölliseen sähkönlaadun analysointiin.</p>	
Avainsanat	LED-lamppu, käynnistysvirta, sähköteho, harmoninen yliaalto

Author Title Number of Pages Date	Mikko Annala The Effects of LED-bulbs in Electrical Planning in an Amusement Park Environment 47 pages 9 March 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Tapio Kallasjoki, Senior Lecturer Marko Tikkanen, Operations Manager
<p>The purpose of this study was to examine the four most popular LED-bulbs used in an amusement park environment at Linnanmäki Amusement Park. The aim of the measurements conducted in this research was to examine the effects of LED-bulbs, often considered energy efficient, on the electricity network.</p> <p>The measuring devices used in this research were both an oscilloscope as well as a power quality analyzer. Measurements were conducted on the inrush current of LED-bulbs, the nominal current and wave length of the electric current, total harmonic distortions, as well as electrical power itself.</p> <p>The results of this research show that these LED-bulbs, although energy efficient, may also have negative effects on the electricity network. It was detected that the inrush current of LED-bulbs is tens of times more powerful compared to the nominal current. When measuring the electrical power, it could be seen that the powers show asymmetry and that total harmonic distortions could be found especially in electric current.</p> <p>From the results based on the measurements of both inrush and nominal currents, a load table could be drafted, that will eventually ease the design of lighting groups. The load table also provided framework for a maximum load of circuit breakers according to these inrush and nominal currents.</p> <p>As stated above, measurements show that LED-bulbs possess great amounts of harmonic distortions as well as components due to the non-linearity of the electrical current and voltage. This can cause problems in the future. For this reason, amusement parks, as well as other properties possessing large amounts of LED-bulbs, should invest in regular analyzing of electrical quality.</p>	
Keywords	LED-bulb, inrush current, electricity power, total harmonic distortion

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Linnanmäki	2
3	LED valonlähteenä	4
3.1	Ledin toimintaperiaate	4
3.2	Kehitys	7
3.3	Hyödyt ja haitat	10
4	Tarkasteltavat LED-lamput	14
4.1	Airam LED antique 5 W:n filamentti-LED-lamppu	15
4.2	E3 Light pro A55 star LED 2 W	16
4.3	BLTC A60 0,3 W	17
4.4	Philips MASTER LEDlustre DT 4 W	17
5	Mittaukset	18
5.1	Mittausten suoritus	18
5.2	Virran ja jännitteen käyrämuodot	19
5.3	Käynnistysvirtamittaus I_{START} , kesto aika ja virran vakiintumisaika	22
5.3.1	Yhden LED-lampun mittaukset	22
5.3.2	20:n LED-lampun mittaukset	25
5.3.3	50:n LED-lampun mittaukset	28
5.3.4	Mittaustulosten yhteenveto	31
5.4	Sähkötehon mittaus	32
5.5	Harmonisten ja epäharmonisten yliaaltojen mittaus	34
6	LED-valaistuksen kuormituksen suunnittelu	39
6.1	Magneettinen pikalaukaisu	39
6.2	Terminen ylikuormitussuojaus	43
7	Yhteenveto	45
	Lähteet	46

1 Johdanto

LED-tekniikan (Light Emitting Diode) huiman kehittymisen johdosta on sähkönkuluttajan mielenkiinto kasvanut energiatehokkaita ja käytettävyydeltään monipuolisia LED-lamppuja ja -valaisimia kohtaan. Nykypäivän LED-lampuissa on monia hyviä puolia. Ne tuovat kuluttajille säästöjä edullisten hankintakustannusten ja pitkän käyttöiän sekä energiatehokkuuden vuoksi.

LED-lamppujen huonoja puolia kuitenkin on lampun elektroniikan aiheuttamat häiriöt sähköverkkoon. Vanha hehkulampputekniikka tuotti vain valoa ja lämpöä, mutta LED-lampun elektroniikka saa aikaan käynnistyessä suuria virtapiikkejä sekä epälineaarinen kuorma aiheuttaa jännitteeseen ja virtaan häiriöitä.

Opinnäytetyö tehdään Lasten Päivän Säätiön sr (säätiö rekisteröity) omistamalle Linnanmäen huvipuistolle. Linnanmäen huvipuiston suuren valaistusmäärän vuoksi myös valaistuksen energiatehokkuuteen panostetaan huomattavan paljon. Huvipuistossa valaistusta on kaikkialla kuten esimerkiksi kiinteistöissä, aluevalaistuksessa ja huvipuistolaitteiden valaistuksessa. Vanhaa valaistustekniikkaa on jo vuosien saatossa järjestelmällisesti muutettu energiatehokkaampaan suuntaa.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia Linnanmäellä yleisesti käytössä olevaa neljää eri LED-lamppua. LED-lampuille suoritetaan mittauksia, joista tarkoituksena on saada selville mahdollisia uhkia, joita yleistynyt LED-tekniikka sisältää. LED-lampuista mitataan virran käyrämuoto, valaistuksen suunnittelussa huomioon otettava käynnistysvirta, kuormituksen muodostuminen sekä mahdolliset sähköverkkoon vaikuttavat virran- ja jännitteen yliaallot.

2 Linnanmäki

Helsingin Alppilan vesilinnanmäellä sijaitseva Linnanmäen huvipuisto on Lasten Päivän Säätiön omistuksessa oleva Suomen suosituin huvipuisto. Vuosittain siellä käy yli miljoona huvittelijaa.

Linnanmäen huvipuisto on perustettu vuonna 1950, joten siellä on hauskuutettu ihmisiä jo 67 vuoden ajan. Huvipuistoa operoiva Lasten Päivän Säätiö on perustettu vuonna 1957 kuuden eri lastensuojelutyötä tekevän järjestön toimesta. Kyseiset järjestöt ovat Pelastakaa lapset ry, Parasta lapsille ry, Mannerheimin lastensuojeluliitto ry, Lastensuojelun keskusliitto ry, Ensi- ja turvakotien liitto ry ja Barnavårdsföreningen i Finland. (17.)

Lasten Päivän Säätiö tarkoituksena on ylläpitää ja kehittää Linnanmäen huvipuistoa, jonka tuotoilla tuetaan varallisesti perustajajärjestöjen tekemää lastensuojelutyötä. Vuonna 2017 Lasten Päivän Säätiön lastensuojelutyölle jaettu tuki on 4,5 miljoonaa euroa. (17.)

Linnanmäki työllistää vakituisesti noin 60 työntekijää ja kesäisin noin 700 kausityöntekijää.

Valaistus Linnanmäellä

Huvipuistomaisen tunnelman luomisen yksi tärkeimmistä elementeistä on valaistus. Huvipuistojen valaistustekniikka kehittyy hurjaa vauhtia LED-tekniikan ansiosta. Nykyinen LED-valaistus mahdollistaa monipuolisia valon ohjausmahdollisuuksia, väri vaihtoehtoja ja käyttötarkoituksia.

Linnanmäellä on lukuisia määriä erilaisia valaisimia, lamppuja, valaistuskokonaisuuksia sekä näiden käyttöä vaativia valaistuksenohjausjärjestelmiä. Perusvalaistus koostuu pääasiassa kiinteistöjen valaistuksesta sekä huvipuiston yleisvalaistuksesta. Valaistuskokonaisuuksia ovat huvipuistolaitteiden yksilöidyt valaistukset, puistoalueita ja yksityiskohtia korostavat valaistukset, joita käytetään kiinteästi taikka erilaisilla valaistusohjauksilla.

Linnanmäki on perustettu vuonna 1950, joten huvipuisto on vanha. Vanhoja laitteita on vielä jäljellä, kuten vuoristorata, ja näiden vanhojen laitteiden valaistus on aikaisemmin sen ajan mukaisesti toteutettu hehkulampputekniikalla. Huvipuistokäyttöön tarkoitettu LED-tekniikka onkin vuosien aikana mahdollistanut vanhan valaistustekniikan uudistamisen energiatehokkaampaan suuntaan. Uudemmat laitteet ovat jo valmistusvaiheessa toteutettu LED-tekniikalla.

Linnanmäellä on yksittäisiä valonlähteitä jopa yli satatuhatta. Suurin osa lampuista on LED-tekniikkaa huvipuistolaitteissa, mutta myös vanhaa hehkulampputekniikkaa on jäljellä. Vanhaa hehkulampputekniikkaa muutetaan jatkuvasti LED-tekniikkaan, jotta saadaan huvipuistosta entistä energiatehokkaampi sekä nykyaikaisempi. Hyvänä esimerkkinä on vuoristorata, jossa rataa kiertää noin 3030 lamppua, jotka ovat alkuperäisesti olleet hehkulamppuja, mutta nyt lähes täysin korvattu LED-lampuilla. Matalan hyötysuhteen vanhojen lamppujen vaihtaminen korkean hyötysuhteen LED-lamppuihin huvipuistoissa tuo suuria energiasäästöjä.

Tarkoituksena on tutkia hyötyjen lisäksi, mitä haittapuolia tämä nykypäivän LED-tekniikka tuo mukanaan korkean valokapasiteetin omaavissa huvipuistoissa sekä mitä suojausten osalta tulee ottaa huomioon. Tutkimuksen kohteena on muutamia perus-LED-lamppuja, joita käytetään suuria määriä Linnanmäellä sekä mahdollisesti myös muissa huvipuistoissa.

3 LED valonlähteenä

Valoa säteilevä diodi eli LED on noussut valaistustekniikan markkinoilla suureen suosioon, johtuen valonlähteen alhaisen sähkönkulutuksen sekä tekniikan kehityksen myötä tapahtuneesta hintojen laskusta. Ledi on ollut valaistustekniikan historiassa mullistavin keksintö sitten hehkulampun kehittämisen jälkeen.

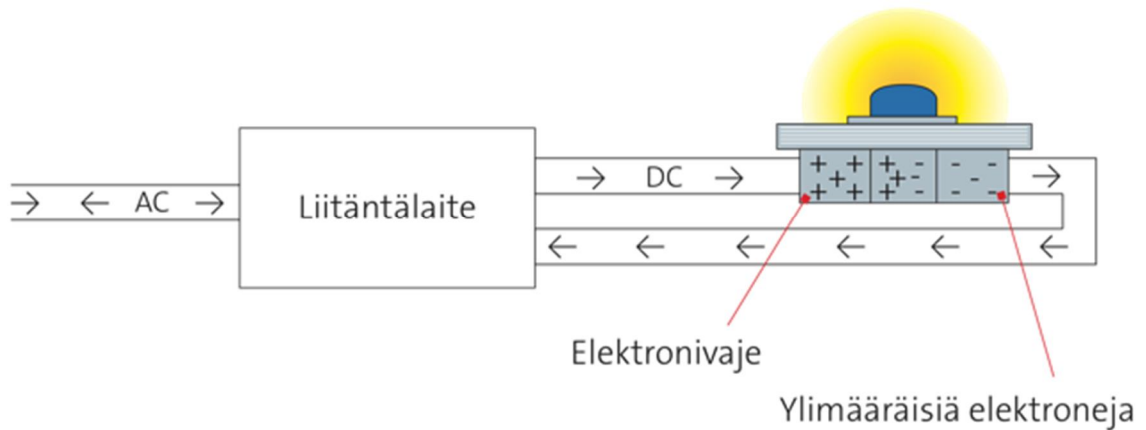
Vähäisen energiankulutuksen lisäksi kuluttajien etuja ovat muun muassa LED-valaistuksessa lamppujen hyvä valotehokkuus ja alhainen lämpötila verrattuna vastaavan valovirran tuottavaan perinteisiin hehkulamppuun.

3.1 Ledin toimintaperiaate

Ledin toiminta poikkeaa oleellisesti hehkulampusta. Hehkulamput säteilevät valoa sivutuotteena, kun sähkövirtaa johdetaan hehkulangan läpi. Vastaavasti ledit loistavat valoa johdettaessa elektroneja valoja säteilevään puolijohteeseen sähkövirran avulla. (1.)

Syötettäessä tasavirtaa LED-puolijohdediodiin syntyy diodin aktiivisessa osassa valoa. Tätä kutsutaan elektroluminesenssiksi. Loistediodin rakenteessa on p- ja n-liitosalueet. Liitosalueiden välillä on epätasapainoa, jolloin n-johdealueella on enemmän elektroneja ja p-johdealueella vähemmän elektroneja. Kytettäessä puolijohdediodiin tasavirtaa alkaa elektronien epätasapaino tasoittua n-johdealueen sekä p-johdealueen välissä, kun positiiviset sekä negatiiviset elektronit yhdistyvät keskenään. Tämän tuotoksena syntyy valoa. (2.)

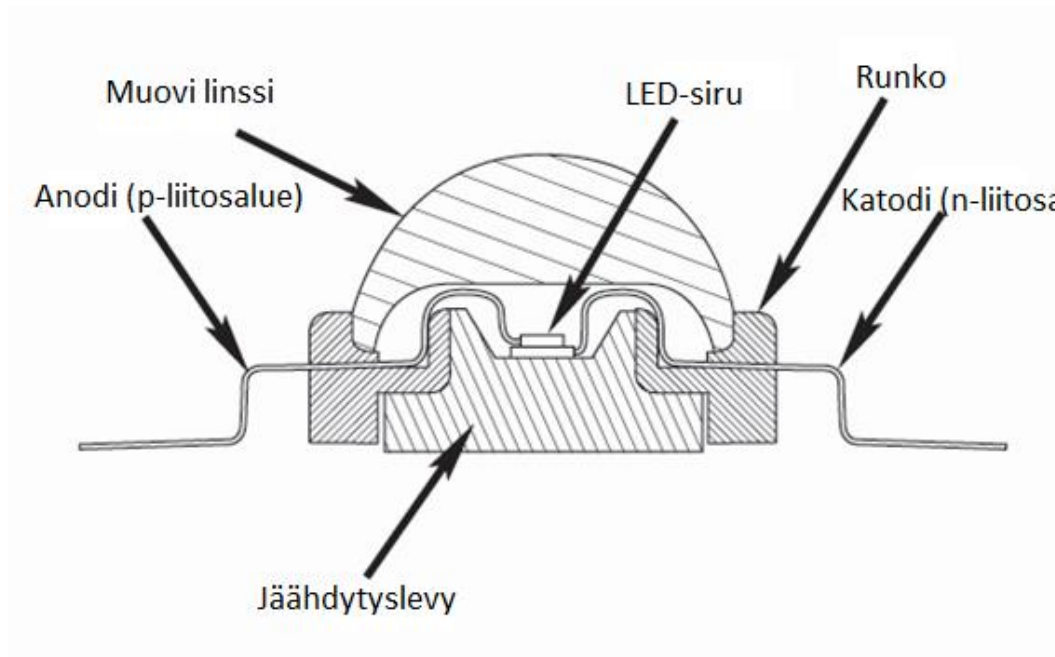
Kuvassa 1 on havainnollistettu LED-diodin toiminta. Loistediodiin kytkettäessä tasavirtaa positiiviset- sekä negatiiviset elektronit vetävät toisia puoleensa, jonka seurauksena syntyy valoa.



Kuva 1. Loistediodin toiminta (2).

Ledit ovat kooltaan noin 1 . 2 mm kokoisia puolijohdekiteitä, jotka asennetaan moduuliin ja koteloidaan, koska yhden diodin valovirta on hyvin pieni ja harvoin riittävä. Moduuli rakennetaan piirilevyyn, johon asennetaan lampun tai valaisimen tarvitsema määrä valodiodeja. Teholähde voidaan asentaa piirilevymoduuliin tai se voi olla ulkoisena teholähteenä. Koteloinnin avulla diodit suojataan mekaanisesti sekä sähköisten kytkentöjen vuoksi. Koteloinnin avulla voidaan vaikuttaa valon säteilykulmaan. (3.)

Kuvassa 2 on esitetty puolijohdekomponentin rakenne. Puolijohdekomponentissa on kuori, johon komponentin tekniikka on rakennettu. Puolijohdekomponenttiin tulee kaksi liitinpintaa anodi ja katodi. Liitinpinnat ovat merkittyjä, koska puolijohdekomponentti johtaa sähköä vain toiseen suuntaan. Rungon keskellä on LED-siru, jonka päällä on muovilinssi. LED-siru tuottaa paljon lämpöä. Tästä syystä siihen on kiinnitetty viilennyslevy, jonka avulla lämpö johdetaan piirilevyyn.



Kuva 2. Puolijohdekomponentin rakenne (3).

LED-puolijohdekomponentilla ei ole sähköistä vastusta, joten sen läpimenevää virtaa täytyy rajoittaa. Virranrajoitus on paras tehdä ledille tarkoitetulla tehonlähteellä. Tehonlähteitä on LED-valaisimelle tarkoitettuja erillisiä LED-tehonlähteitä eli LED-liitäntälaitteita. Perinteisissä LED-lampuissa tehonlähde on sijoitettu lampun sisälle piirikorttiin, jossa 230 V:n verkkojännite muunnetaan ledille sopivaksi käyttöjännitteeksi. (4, s. 11.)

LED-liitäntälaitteita on kahden tyyppisiä, vakiovirta- sekä vakiojänniteliitäntälaitteita. Vakiojänniteliitäntälaitetta käyttävät valaisimet ovat yleisempiä eli perinteiset sisustusvalaisimet, valaisinnauhat yms. Vakiovirtaliitäntälaitetta käytetään suuritehoisissa ledeissä. LED-liitäntälaitteet suojataan sähköisesti yleisimmin käyttäen SELV-järjestelmän muuntajaa (Safety Extra Low Voltage) eli suojajännitemuuntajaa, jolloin jännite on rajattu alle 50 V:n vaihtojännitettä tai 120 V:n tasajännitettä. LED-liitäntälaitteissa on lisäksi oikosulkusuojaus, ylikuormitus- ja ylikuumenemissuojaus. (3.)

Ledin spektri eli väri on monokromaattista eli yksiväristä, ja se määräytyy puolijohteen valmistusmateriaalin mukaan. Puolijohteen koostumuksesta riippuen perinteisesti käytetyt värit ovat punainen, keltainen, meripihkan oranssi (amber), vihreä ja sininen. LED-

diodien hyvä ominaisuus on, etteivät ne tuota IR- ja UV-säteilyä (infrapuna ja ultra-violetti). (2; 3; 5.)

Valkoista valoa luodaan yleisimmin lisäämällä sinisen ledin pinnalle kerros keltaista tai oranssia loisteainetta, tätä kutsutaan luminenssikonversioksi. Toinen tapa luoda valkoista valoa on käyttää punaisen, vihreän sekä sinisen loistediodin sekoitusta. RGB-valoa (red, green, blue) tuottava lamppu tai valaisin varustetaan erillisellä ohjaimella tai käyttöliittymällä. RGB-ohjauksella saadaan aikaan noin 65 000 erilaista värisävyä, mikä mahdollistaa monipuolisia valaistusratkaisuja sitä vaativissa kohteissa. (2.)

3.2 Kehitys

Elektroluminesenssi-ilmiö, johon ledin toiminta perustuu, havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1907 englantilaisen Henry Joseph Roundin toimesta. Ilmiössä todettiin epäorganisten materiaalien tuottavan valoa sähkövirran avulla. Nykypäivänä kuitenkin elektroluminesenssin todellisenä keksijänä pidetään ranskalaista Georges Destriauta, joka havaitsi valoemission sinkkisulfidissa vuonna 1935. (5.)

Elektroluminesenssi-ilmiön tutkimista jatkettiin vuoteen 1951, kunnes transistorien kehittämisen myötä valoemissio pystyttiin selittämään. (5.)

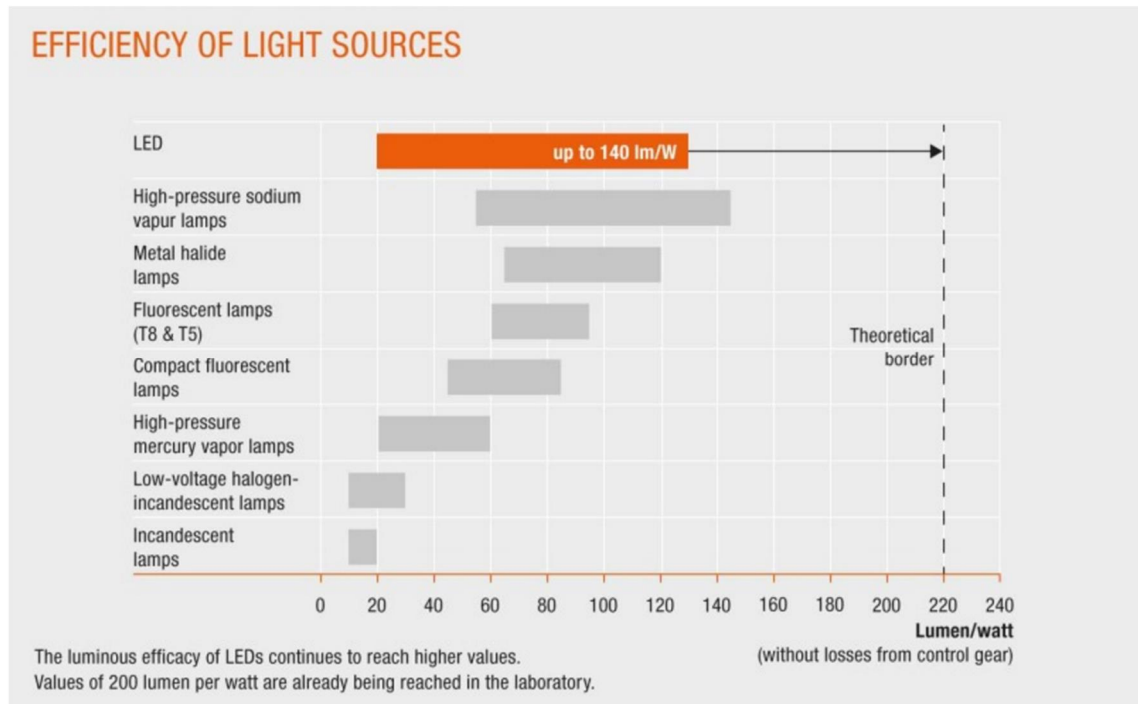
Ensimmäinen punainen led tuotettiin teollisesti ja saatettiin markkinoille vuonna 1962. GaAsP-tyyppisen (Gallium, Arseeni, Fosfori) punaisen luminesenssidiodin kehitti amerikkalainen Nick Holonyakin. Ledien kehitys jatkui edelleen, ja vuoteen 1971 mennessä oli kehitetty uusia puolijohdemateriaaleja, joilla pystyttiin tuottamaan keltaista, oranssia ja vihreää näkyvää valoa. (5.)

Ledien käytössä tapahtui nopea kasvu 1980-luvulla. Samaan aikaan kehiteltiin uutta puolijohdemateriaalia GaAIAs (Gallium, Alumiini, Arseeni). GaAIAs materiaali on 10 kertaa kirkkaampi kuin edeltänyt led-materiaali. Kasvaneen valotehokkuuden ja monikerroksisuuden myötä GaAIAs-puolijohdemateriaali oli suuri kehitys LED-tekniikalle, vaikka alkuun sitä ei ollut kuin punaisella spektrillä saatavilla. Ledien kehityksen sekä suosion myötä myös ohjausmahdollisuudet olivat parantuneet, mikä mahdollisti niiden käytön taustaa muuttavissa kylteissä sekä tarjosi mahdollisuuden käyttöön erilaisissa sovelluksissa. Ledien nopean kehityksen myötä 1980-luvun loppupuolella laserdiodit

tuotiin markkinoille sekä kehitettiin uusi puolijohdemateriaali InGaAlP (Indium, Gallium, Alumiini, Fosfori), jonka avulla pystyi valmistamaan keltaista, oranssia, vihreää ja punaista lediä samalla perustekniikalla. (6.)

Erilaisten LED-valaistussovellusten kehittäminen jatkui 1990-luvulla ja LED-tekniikkaa käytettiin yleisesti liikenteenohjaukseen, erilaisissa näyttötauluissa ja autoteollisuuden sovelluksissa. Shuji Nakamura kehitti InGaN-puolijohdediodin (Indium, Gallium, Nitridi) vuonna 1993. InGaN-diodilla pystyi tuottamaan sinisen ja vihreän värisävyä valoa korkealla valotehokkuudella. Hieman myöhemmin hän kehitti myös valkoisen valoa tuottavan ledin päällystämällä sinisen ledin kellertävän loisteaineen avulla. Valkoista valoa tuottava led tuli markkinoille vuonna 1996. InGaN-materiaalista lisäksi pystyy tuottamaan violetteja, sinisiä ja vihreitä laser-diodeja. Erityisesti violetti-laserdiodi mullisti viihde-elektroniikka alan mahdollistamalla blue-ray-soittimen kehittämisen. (6; 7.)

Valkoista valoa tuottavat ledit ovat kehittyneet hurjaa vauhtia 2000-luvun alusta nykypäivään. Erityisesti LED-lamppujen valotehokkuuden kasvaminen sekä hintojen aleneminen on mahdollistanut niiden suuren kulutuksen. LED-lamppujen valotehokkuus on moninkertaistunut kehityksen myötä, ja nykypäivänä keskivertolampun valotehokkuus on noin 100 lm/W. Kehitys jatkuu koko ajan, ja teoriassa ledin valotehokkuus voi olla jopa 220 lm/W. Kuvassa 3 on esitetty eri lampputyypin valotehokkuuksia. (5.)



Kuva 3. Valonlähteiden valotehokkuus lm/W (5).

Nykyään suuri osa valaistuksesta korvataan LED-tekniikalla. Sen on mahdollistanut ledin energiatehokkuus, säätö- sekä ohjausmahdollisuudet ja tuotteiden nopea kehitys. Saatavilla on lukuisa määrä erilaisia lamppuja, valaisimia sekä LED-moduuleita. Nopea LED-tekniikan kehittyminen mahdollistaa valaistuksen muuttumisen tehokkaaksi, mukautuvaksi ja helposti asennettaviksi LED-valaistusjärjestelmiin. (5.)

EU (Euroopan Unioni) on 2000-luvulla lähtenyt luomaan asetuksia, joiden avulla matalan energialuokituksen omaavia lamppuja saatetaan pois markkinoilta. Kioton ilmastopöytäkirjan (1997) pohjalta EU on luonut ecodesign-direktiivin ErP (Energy related Product). ErP-direktiivi keskittyy ekologiseen suunnitteluun, jolla saavutetaan tuotteen vähäinen energian kulutus ottaen huomioon tuotteen koko elinkaari. (8.)

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusten 244/2009 sekä 245/2009 tavoitteena on jaksittain poistaa kuluttajien markkinoilta matalan energialuokituksen omaavat valaistustuotteet. Asetus EU 244/2009 koskee kotitalouksissa käytettäviä ympäristöystävällisiä lamppuja ja asetus EU 245/2009 koskee loiste- ja suurpaineputkalamppuja, sekä niiden virranrajoittimia. Lamppujen ja valaisinten energiamerkintä muuttui vuonna 2013 asetuksen EU 874/2012 mukaisesti. Vanha merkintätapa A, G muuttui A++, E luokitus-

seen, kun poistettiin vanhat F- ja G-luokat sekä lisäämällä A++- ja A+-luokan kertomaan laitteen hyvästä energiatehokkuudesta. (5.)

Euroopan parlamentti on kumonnut vuonna 2017 vanhan energiamerkintöjä koskevan direktiivin 2010/30/EU ja käyttöön on tullut uusi energiamerkintäasetus (EU) 2017/1369. Uudessa energiamerkintädirektiivissä määritetään energiamerkintöjen uudelleenskaalaus yhdenmukaiseen A- G-luokitukseen sekä määritetään säädöksiä tuotteiden tuotetietokantaa varten. Yhdenmukaisen A- G-asteikon Euroopan komissio hyväksyy viimeistään vuonna 2023. (9.)

3.3 Hyödyt ja haitat

Hyödyt

Ledillä on monia käytön kannalta hyviä ominaisuuksia, mutta kaikkein tärkeimmät ominaisuudet ovat hyvä energiatehokkuus sekä ympäristöystävällisyys. Alhaisten käyttökustannusten takia ledit ovat energiantehokkuusluokaltaan vähintään A+-luokiteltuja.

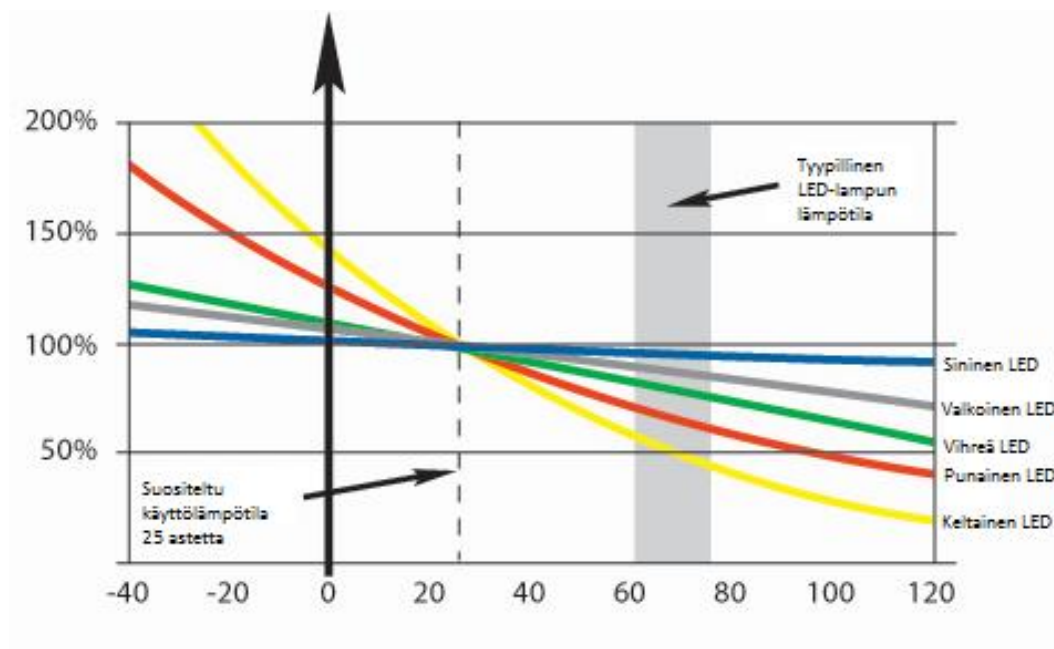
Ledillä on erittäin hyvä valotehokkuus (lm/W), mikä tarkoittaa, että lampun lähettämä valovirran eli lumen-määrä on hyvä kulutettua sähkötehoa kohden. Hehkulampun valotehokkuus on keskimäärin 12 lm/W, kun taas hehkulampun korvaavalla ledillä on 60- 100 lm/W. Tämä merkitsee energian kulutuksessa huomattavia säästöjä.

Alhaiset käyttökustannukset saavutetaan ledin hyvän valotehokkuuden, CO₂-päästöjen sekä ylläpitokustannusten ansiosta. Vaikka ledin ostokustannukset ovat huomattavasti kalliimpia kuin perinteisillä lampuilla, kustannukset kuitenkin kompensoituvat säästetyn sähköenergian sekä käyttöiän myötä. Hyvin toteutetussa valaistusjärjestelmässä säästö perinteisiin valaistusjärjestelmiin verrattuna voi olla jopa 80 %. (5.)

Ledi harvoin menee rikki, käytännössä LED-lampuissa sekä valaisimissa tehonlähde voi vioittua. Ledissä kuitenkin tapahtuu valovirran alenemista. LED-pakkauksissa ilmoitettu käyttötuntimäärä vastaakin lampun käyttöaika suhteessa siihen, kun valovirta on jäljellä 70 % (L70). Ledin käyttötuntimäärä vaihtelee 20000. 50000 tuntia normaalissa käyttölämpötilassa, normaalia alhaisemmassa lämpötilassa käyttöaika voi olla suurempi ja vastaavasti lämpimämmässä on alhaisempi käyttöaika. (3.)

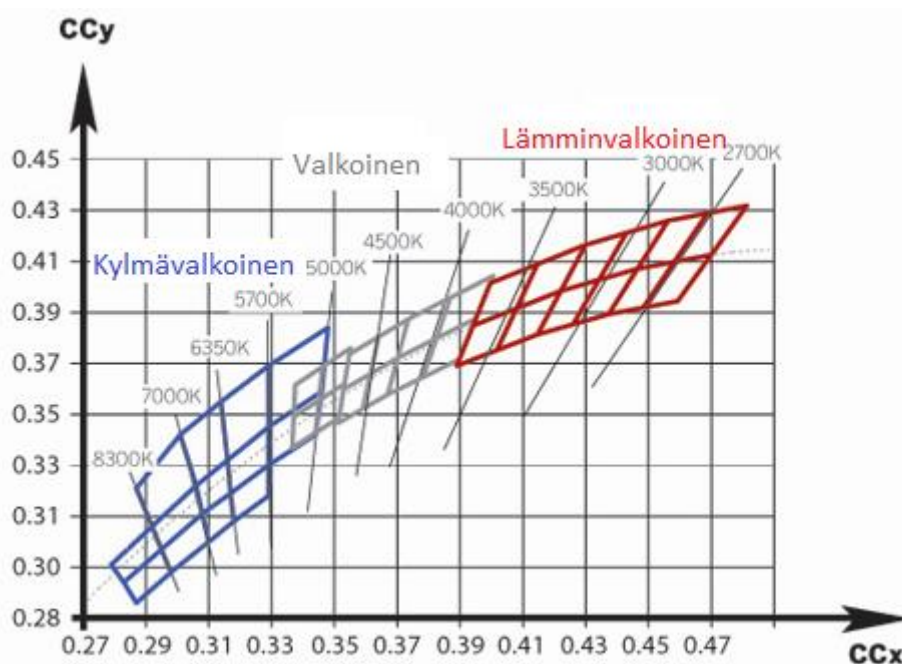
Ledin pitkä käyttöikä toteutuu, mikäli jäähdytys on toteutettu hyvin. LED-diodi tuottaa paljon lämpöä, joka täytyy johtaa ympäristöön, joten tätä varten LED-lampuissa sekä valaisimissa on jäähdytyslementti. Käyttöympäristön lämpötilalla on suuri merkitys ledin elinkaareissa. Lyhytkestoinen lämpö laskee värientoistoa ja valotehokkuutta. Pitkäkestoinen korkea lämpötila nopeuttaa valotehon laskua ja lyhentää elinikää. Lediä käytettäessä ilmoitettua kylmemmässä ympäristön lämpötilassa voi ledin elinikä ja valon määrä kasvaa. (3.)

Kuvassa 4 on esitetty valonmäärä suhteessa ympäristön lämpötilaan. Suositeltu käyttölämpötila on 25 °C, mutta tyypillinen lampun lämpötila on 60. 80 °C kun otetaan huomioon asennustapa ja ympäristön lämpötila. Lämpötilamuutokset voivat myös muuttaa värisävyä.



Kuva 4. Valonmäärä suhteessa ympäristön lämpötilaan (3).

LED-lampuilla on hyvät valinnanvarat valon värisävyssä, ja valmistajat jakavat valkoiset ledit kolmeen pääkategoriaan: lämmin valkoinen, valkoinen ja kylmä valkoinen. Ledien valmistuksessa tasainen laatu varmistetaan BINNING-menetelmän avulla, jossa määritetään diodin värilämpötila. Kuvassa 5 selviää Hide-a-lite tuotemerkin kolmen eri valkoisen värikategorian BINNING-luokitukset. (3.)



Kuva 5. Hide-a-liten valkoisen ledin valinta/BINNING (3).

Muita ledin hyviä puolia ovat nopea syttyvyys täyteen valotehoon se, että LED-elementin jo luonnostaan suuntaava valo on kohdistettavissa erilaisilla linssiratkaisuilla. LED-diodi ei myöskään sisällä elohopeaa tai muita raskasmetalleja, joten led ei ole ongelmajätettä ja se voidaan kierrättää SER-romun (sähkö ja elektroniikka) mukaisesti. Ledien kierrätys on lisäksi helppoa, koska lamppuja myyvät liikkeet ovat velvollisia vastaanottamaan rikkinäiset lamput.

LED-lamppujen ja valaisimien valon säätäminen on helppoa ja tekniikka antaakin mahdollisuuden todella älykkääseen valo-ohjaukseen. LED-valaisimien liitälaitteita on saatavilla kaikille väyläohjauksille, joilla valaistusta voidaan säätää.

Haitat

Lämpötila on suuri riskitekijä ledin kestävyydelle ja voi jopa vaikeuttaa lampun sekä valaisimen suunnittelua. LED-diodi kuumenee siihen syötettäessä sähkövirtaa, näin ollen se tarvitsee jäähdytyslementin. LED-diodin ja riittävän jäähdytyslementin soveltaminen yhteen voi olla hankalaa, koska jäähdytyslementin täytyy olla lampussa tai valaisimessa. Erityisesti suuritehoisten valaisimien jäähdyttäminen voi olla ongelmallista.

Lämpötilan nousu vaikuttaa suoraan ledin elinikään. Ledin käyttölämpötilaan vaikuttavat ympäristön lämpötila, virran tuottama lämpö sekä asennustapa. Näin ollen asennusympäristöllä on suuri vaikutus ledin käyttöikään. Korkeat diodin pintalämpötilat sekä korkea käyttöikä aiheuttavat ledissä värimuutoksia yleensä sinisemmäksi.

Tällä hetkellä suurin osa ledeistä tulee Kiinasta, eikä niiden valmistamisen valvominen ole riittävää, joten tuotteiden turvallisuudessa saattaa olla puutteita. Turvallisuutta valvoo Suomessa Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Valmistajien ilmoittamat ledien teknisten arvojen todenmukaisuuteen kannattaa myös suhtautua kriittisesti, esimerkiksi käynnistyskertoihin, käyttötuntimäärään sekä erityisesti pienitehoisten lamppujen todelliseen virran kulutukseen.

Ledin käyttämät tehonlähteet sisältävät elektroniikkaa, joten tehonlähteeseen syötetty sähkövirta ei ole puhdasta siniaaltoista sähkövirtaa. Ledin tehonlähde ottaa käynnistyessä virtapiikin (I_{START}), virtapiikki voi olla jopa 60-kertainen ledin nimellisvirtaan (I_N) verrattuna, joten tämä rajoittaa erityisesti suuritehoisten ledien ryhmittämistä, jottei suojalaitteiden kanssa tule ongelmia. Ledin tehonlähde syöttää lisäksi häiriötä syöttävään sähköverkkoon, koska tehonlähteen tasasuuntauselektroniikka rikkoo normaalin verkkosähkön.

Vaikkakin ledin himmentäminen onkin helppoa, vanhoihin säädinkäyttöihin led ei yleensä sovellu. Vanha hehkulamppusäädin tulisikin korvata LED-lampuille tarkoitettuun tai LED-valaisimen liitäntälaitteelle tarkoitettuun säätimeen. LED-säädinkäytöt lisäävät verkkohäiriötä entisestään.

4 Tarkasteltavat LED-lamput

Tutkittavia LED-lamppuja on neljä erilaista mallia, jotka ovat yleisesti käytössä Linnanmäellä. Airamilla ja BLTC:llä on filamenttitekniikkaa hyödyntäviä LED-lamppuja ja e3 lightning, ja Philips käyttävät perinteistä led-sirumenetelmää.



Kuva 6. Tutkittavat lamput. Airam, e3light, BLTC ja Philips.

Kuvassa 6 on tutkittavat LED-lamput ja taulukossa 1 niiden tekniset tiedot.

Taulukko 1. Mittauksessa käytettyjen LED-lamppujen tekniset tiedot lamppujen pakkausten mukaan.

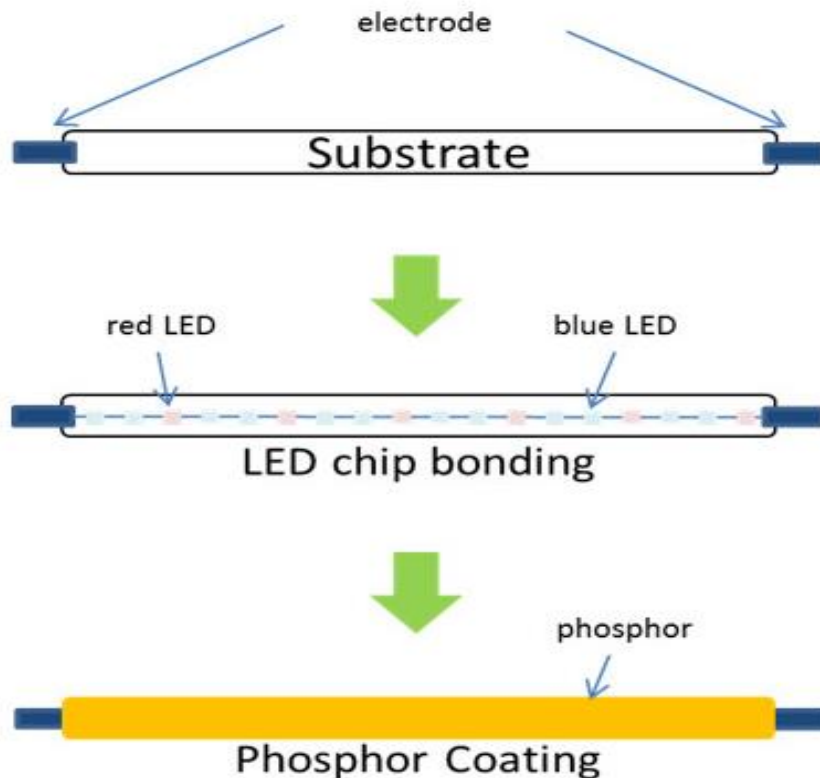
Lamppun merkki	Airam	e3 light pro	BLTC	Philips
Tyyppi	LED Antique A60	A55 starLED	A60	Master LEDluster
Teho [W]	5	2	0,3	4
Tehokerroin [PF]	-	-	0.6	0.7
Valovirta [lm]	380	75	25	250
Värilämpötila [K]	2200	2400	2500	2200-2700
Ra-indeksi [CRI]	80	85	80	80
Käynnistysaika 100% [s]	<1	Instant	-	0,5
Käynnistyskerrat [kpl]	50000	>15000	-	50000
Käyttöikä [h]	10000	30000	40000	25000
Himmennys	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Energialuokka	A++	A+	A+	A+

4.1 Airam LED antique 5 W:n filamentti-LED-lamppu

Huvipuiston maisemoinnissa Linnanmäellä käytetään paljon uudenmallisia filamentti LED-lamppuja eli ns. retro LED-lamppuja. Filamentti LED-lamput ovat hyviä valotehokkuudeltaan ja tarkasteltavan lampun valotehokkuus on 76 lm/W. Hehkulampputyypit set ledit sopivat hyvin valolistoihin korostamaan esim. rakenteiden muotoja, valomainoskyltteihin sekä perinteisesti yleislamppuna käytettynä. Airam LED antique-lamput on kellertäväksi sävytetty lasikupu, jolla päästään lämpimänkeltaiseen värisävyyn (2200 K).

Retrotyyppinen filamentti-LED-lamppu muistuttaa hehkulamppua. Diodin lämmöntuoton jäähdityselementit on poistettu, tätä varten filamenttilampun lasikuvun alla lamput on erikoiskaasua, jonka avulla lämpö johtuu lasinpintaan. Filamenttitekniikka tekee LED-lampuista entistä kevyempiä sekä edullisempia. (10.)

Filamenttikuitu koostuu useista, jopa sadoista LED-siruista, jotka on asetettu läpinäkyvälle lasi- tai safiirialustalle. Tätä tekniikkaa kutsutaan Chip-on-Glass-tekniikaksi (COG). Filamenttikuidun päällyste koostuu silikonin ja loisteaineen seoksesta, joka mahdollistaa niin sinisten kuin punaistenkin LED-sirujen käytön. Kuvassa 7 on esitetty filamenttikuidun kerroksittainen rakennekuva. (10.)



Kuva 7. Filamentin valmistusprosessi (10).

4.2 E3 Light pro A55 star LED 2 W

A55 star LED-lamppu on kehitetty ja käytetään erityisesti erilaisissa huvipuisto- ja teatterikohteissa. Lamppu soveltuu hyvin erityisesti vaativiin olosuhteisiin, koska sitä voi käyttää myös ulkoympäristössä. Lampun kannan ympärillä oleva kumitiiviste, paksu lasikupu sekä lampun rungon ja kuvun välinen tiiveys antavat lampulle IP44-luokan, joka tekee siitä erityisen hyvän ulkokäyttöön. Linnanmäellä kyseistä lamppua käytetään yleislamppuna sisä- ja ulkokäytössä sekä hehkulampun korvaavana vaihtoehtona vuoristoradan ratavalaistuksessa.

Tekniikaltaan A55 star LED on normaali LED-sirulla varustettu lamppu, jonka käyttöjännite voi olla käyttää 130 V:a. 230 V:a. LED-siru on varustettu lieriölinssillä, joka vähentää LED-sirunpinnalta lähtevää kirkkautta, eli luminanssia ja levittää valon tasaisesti linssiä myöten.

4.3 BLTC A60 0,3 W

BLTC:n (Beautiful Light Technology Corporation) valmistamat A60-lamput on tarkoitettu erityisesti koristekäyttöön. Lamppuja on saatavana erilaisilla värisävyillä, ja ne korvaavatkin koristekäyttöön tarkoitettut hehkulamput. A60 LED-lamput ovat erittäin pienitehoisia (0,3. 1,6 W), ja ne korvaavat 3. 25 W:n hehkulamput. Lamput soveltuvat erityisesti ulkokäyttöön kannan ympärillä olevan muovilaipan ansiosta, jolloin lamppu saavuttaa IP65-luokituksen. Linnanmäellä A60-lamput ovat testikäytössä, ja niitä tullaan mahdollisesti käyttämään koristevalaistuksessa hehkulamppujen korvaavana tuotteena.

A60-lamppu muistuttaa muodoltaan perinteistä hehkulamppua. Lampun kupu on maitolasia, joten LED-elementtiä ei kuvun läpi näe. LED-elementti hyödyntää filamenttitekniikkaa, eli LED-siru on asetettu lasitkun päähän käyttäen COG-menetelmää (Chip-on-Glass).

4.4 Philips MASTER LEDlustre DT 4 W

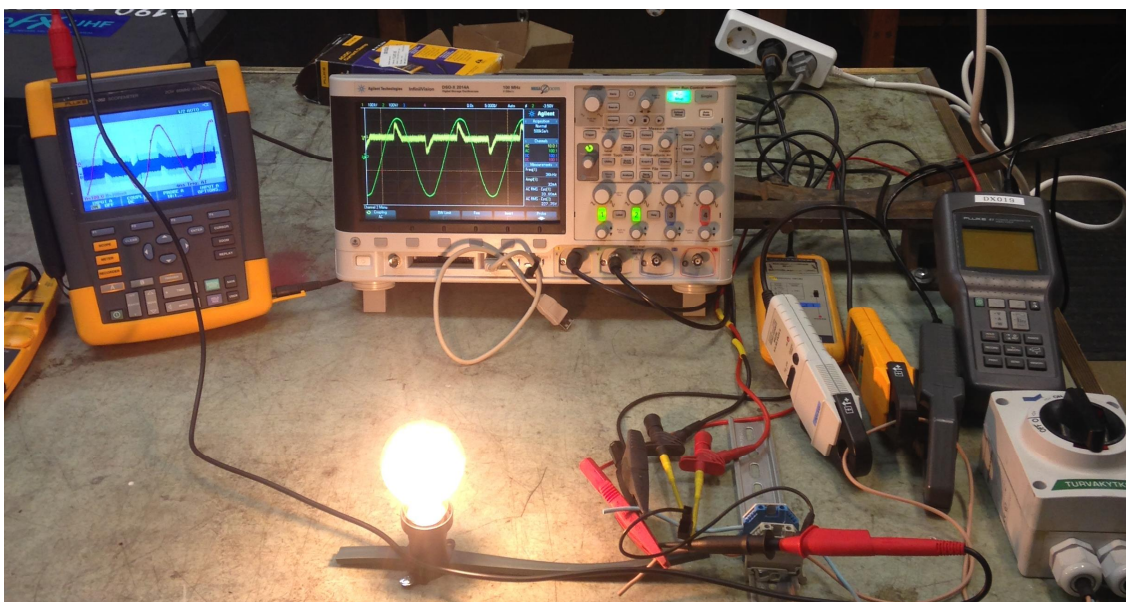
Philipsin LEDlustre-lamppu on suunniteltu muistuttamaan hehkulampun valoa sen säkenöivällä valoefektillä ja valonvärisävyn himmennettävyydellä (2200. 2700 K). Lamppu on hyvä yleisvalaistukseen ja erityisen muotoilun ja himmennettävyyden vuoksi sopii esimerkiksi koristeellisiin kohteisiin. Linnanmäellä LEDlustre-lamppuja on testikäytössä myös vuoristoradan ratavalaistuksessa sekä teemoitus- ja yleiskäytössä.

Tekniikaltaan LEDlustre on normaalilla LED-sirulla varustettu lamppu, jonka valo saadaan kruunumaisesti muotoillun linssin avulla jakautumaan säkenöiväksi valoksi.

5 Mittaukset

5.1 Mittausten suoritus

Mittaukset suoritettiin Linnanmäen sähköverstaan tiloissa. Mittalaitteina käytettiin oskilloskooppia sekä sähkönlaadun analysaattoria. Lamput kytkettiin koristetarkoitukseen käytettävään valokaapeliin, jossa oli mittauksesta riippuen tarvittava määrä kaapeliin kytkettäviä E27 lampun kantoja. Lamput erotettiin sähköverkosta turvakytkimen avulla, joka varmisti mittaushetken turvallisen erotuksen sähköverkosta ja näin varmisti turvallisen työskentelyn. Kuvassa 8 on työpiste sekä yksi lamppu kytkettynä mittalaitteisiin. Mittaustulokset tallennettiin tietokoneella excel-taulukkoon ja mittalaitteiden mittaustulosten kuvat siirrettiin tietokoneelle.



Kuva 8. Työpiste. Keskellä Agilent Technologies DSO-X 2014A ja oikealla Fluke 41.

Oskilloskooppi

Mittauksia aloittaessa kytkettynä oli kaksi oskilloskooppia: Fluke 196C ja Agilent Technologies DSO-X 2014A. Oskilloskoopilla mitattiin LED-lamppujen jännitteitä ja virtoja sekä niiden aaltomuotoja ja kestoajoja. Mitattavat virrat ovat käynnistysvirta, käynnistysvirran vakiintumisaika sekä kulutusvirta ja virtojen aaltomuodot. Mittausten jännite sekä LED-lampun käynnistämisen aikana tapahtuvat jännitteen muutokset mitattiin oskilloskoopilla. Ensimmäisiä mittauksia tehdessä todettiin, että Agilent Technologiesin

oskilloskooppi yksinään riitti mittauksiin, joten Fluken oskilloskooppi poistettiin mittauksista.

Mitattavan kytkennän jännitteen mittauksessa käytettiin differential probe-mittapäätä, jonka avulla mitattava jännite erotetaan oskilloskoopista kelluvaksi mittasignaalksi. Virtamittauksissa käytettiin virtapihtimittapäätä. HAMEG HZ56-virtapihdillä pystyy mitaamaan virtoja 20 A:iin saakka, jolla suurin osa virtamittauksista suoritettiin. Käynnistysvirtamittauksissa 20:llä ja 50:llä LED-lampulla suurten käynnistysvirtojen vuoksi Airamilla ja E3Lightin lampuilla käytettiin virtapihtiä LEM HEME LH240, jolla pystyy suorittamaan virtamittaukset 200 A:iin saakka.

Sähkönlaadun analysaattori

LED-lamppujen sähkötehoa ja käyttäytymistä sähköverkossa mitattiin sähkölaadun analysaattorilla. Mittaukset aloitettiin kuvassa 8 esiintyvällä Fluke 41 1-vaiheisella sähkölaadun analysaattorilla, mutta mittaustulosten epätarkkuuden takia mittari vaihdettiin tarkempaan Fluken 435 3-vaiheiseen sähkölaadun analysaattoriin.

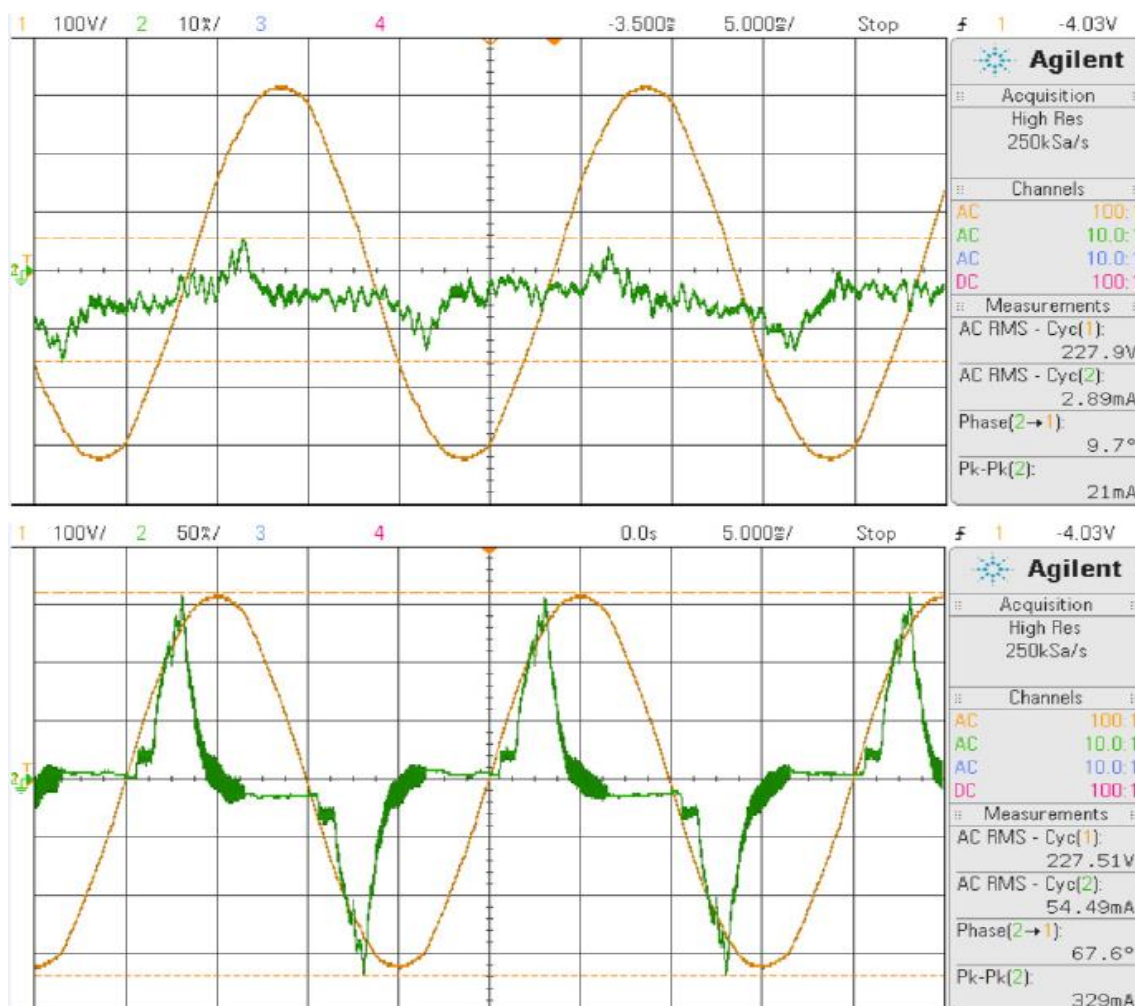
Lamppujen mittaukset suoritettiin 1-vaihemittauksena ja virtapihteinä käytettiin Fluken ja HAMEG 20 A:n virtapihtejä, jotka kytkettiin mitaamaan 1-vaiheen syöttävää ja N-linjan palaavaa virtaa. Yksittäisten lamppujen virtamittausten tulokset olivat niin pieniä, että mitattavia virtoja täytyi vahvistaa kiertämällä useampi virtasilmukka virtapihdin ympärille.

5.2 Virran ja jännitteen käyrämuodot

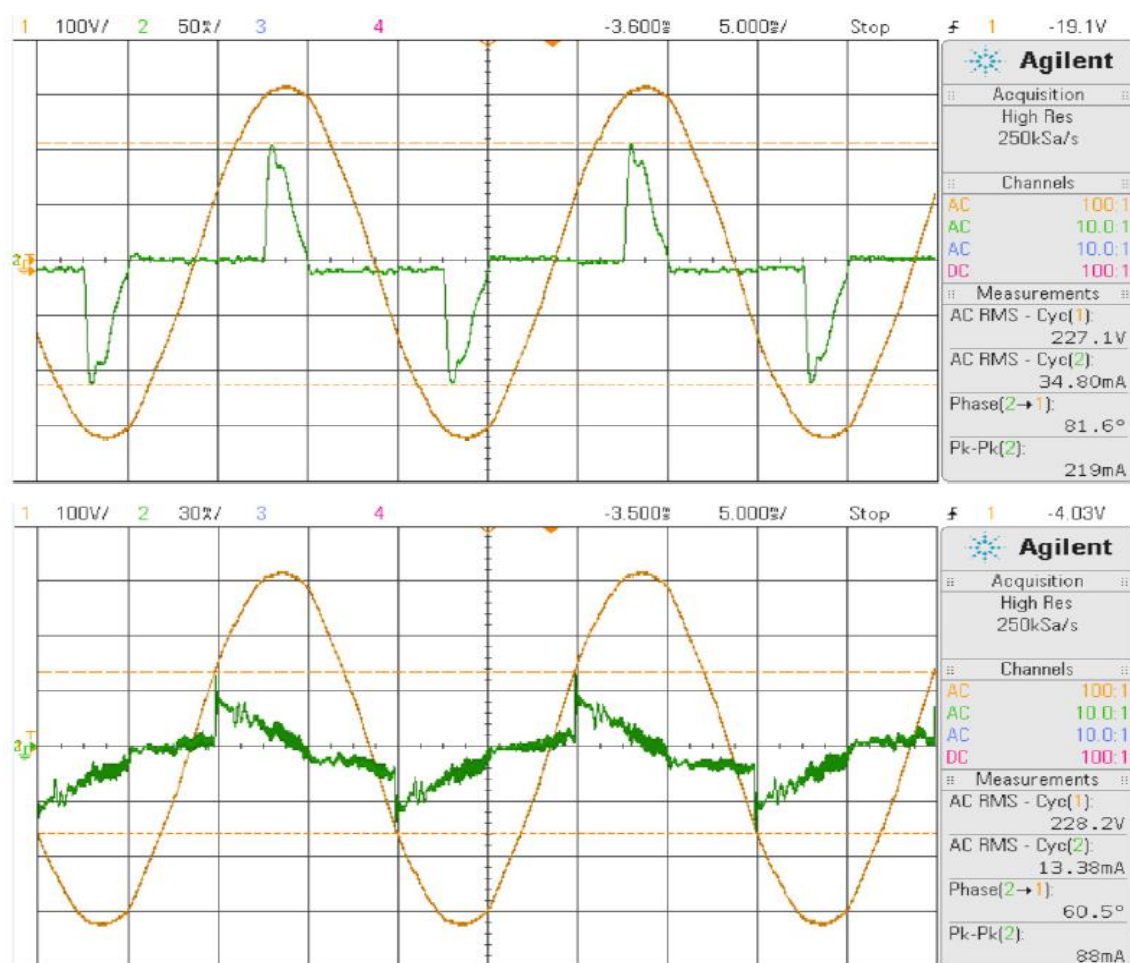
Agilent Technologies DSO-X 2014A-oskilloskoopilla mitattiin jokaisen LED-lampun jännitteen ja virran käyrämuodot sekä virran tehollisarvo ja jännitteen ja virran välinen vaihesiirtymä. Mittaustulokset sekä tallennetut käyrämuodot ovat suoritettu yhdellä LED-lampulla. BLTC:n LED-lampun kuluttama virta on vähäinen, on tuloksissa myös esitetty kyseisen LED-lampun 20kpl:een sarjan käyrämuodot mittaustulosten tarkkuuden parantamiseksi.

Mittauksissa esiintyi LED-lampuilla kolmea erilaista virrankäyrämuotoa. Airamilla ja BLTC:llä virran käyrämuodot olivat samankaltaiset, mutta kuvassa 9 BLTC:n käyrä-

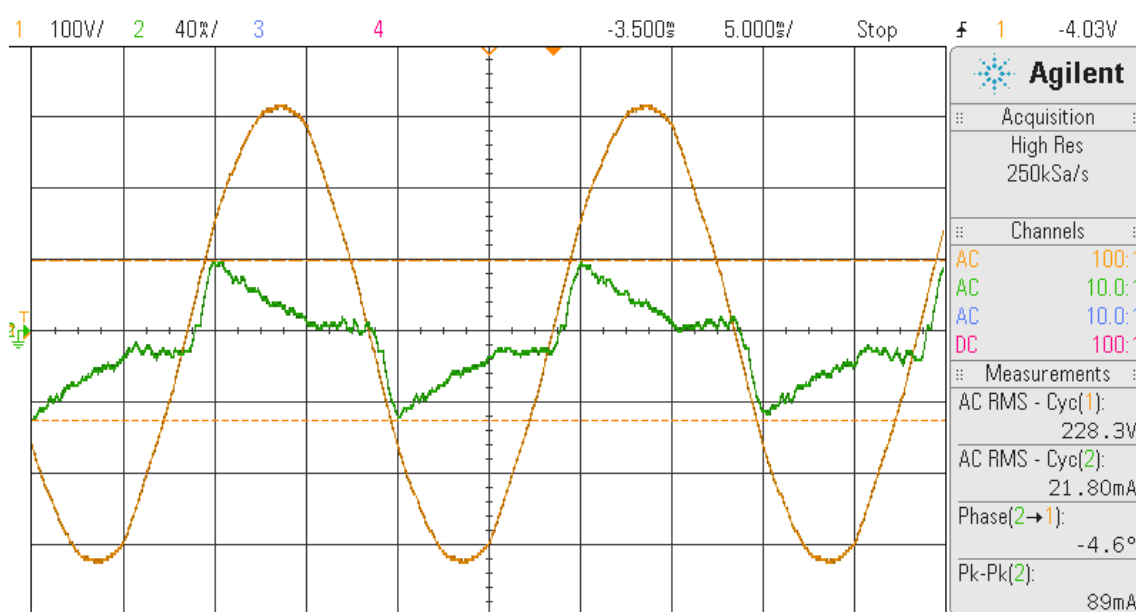
muoto on yhdellä LED-lampulla epätarkka ja 20 LED-lampun sarjalla käyrämuoto on tarkempi. Airamilla, BLTC:llä ja E3Lightilla voidaan havaita kuvista 9 ja 10, että virta oli edellä jännitettä, mitä tarkoittaa lamppujen sisältävän kapasitiivista kuormaa. Kuvassa 11 Philipsin LED-lampussa virta oli hieman jännitettä jäljessä, mikä kertoo lievästi induktiivisesta kuormasta.



Kuva 9. BLTC jännite- ja virtakäyrät. Ylempi yhden LED-lampun ja alempi 20 LED-lampun sarja.



Kuva 10. Jännite- ja virtakäyrät. Ylempi Airam ja alempi E3Light.



Kuva 11. Philips jännite- ja virtakäyrä.

Tallennetuissa jännite- ja virtakäyrissä on oranssi jännitekäyrä ja vihreä virtakäyrä, ja tehdyt mittaukset ovat kuvaajien oikeassa laidassa. Jännite- ja virtakäyristä oskilloskoopilla mitattiin jännitteen tehollisarvo (Cyc 1 rms), virran tehollisarvo (Cyc 2 rms), virran vaihesiirtokulma jännitteeseen nähden (Phase 2→1) ja virran huipusta. huippuun-arvo (Cyc2 Pk-Pk).

5.3 Käynnistysvirtamittaus I_{START} , kesto aika ja virran vakiintumisaika

Käynnistysvirtamittaukset suoritettiin yhdellä LED-lampulla, sekä 20:n ja 50:n LED-lampun sarjalla. Yhden lampun mittauksessa jokaista LED-lamppumallia oli neljä kappaletta, jotta lamppukohtaiset mittauserot saataisiin selville. LED-lamppuja olisi tarvinnut hyvin suuren määrän 20:n ja 50:n sarjan vertailumittauksiin, joten mittaukset suoritettiin samoilla lampuilla.

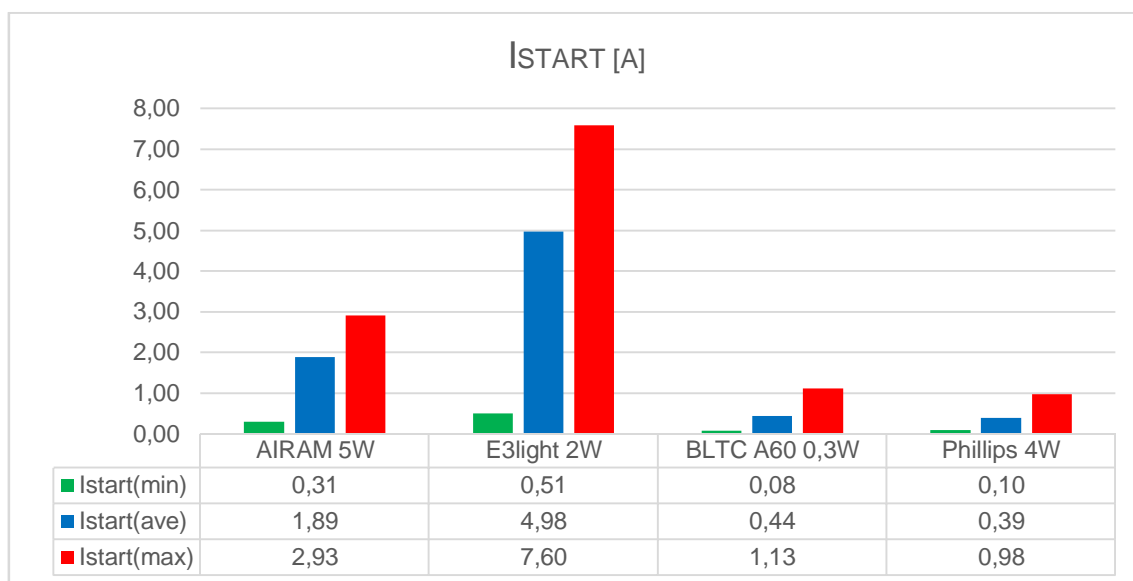
Mittaustulokset vaihtelivat reilusti minimi- ja maksimikäynnistysvirran ja kestoajan välillä. Mittaustulosten vaihteluun vaikutti myös jännitteen ajanjakson kytkentähetki. Käynnistystilanteessa elektroniikan kondensaattorit latautuvat ja käynnistysvirtaan sekä keston vaikuttaa myös sähköä syöttävän linjan koko impedanssi, joka koostuu kaapeloinista, muuntajan tehosta ja tyypistä sekä syöttölinjaan liitetyistä laitteista. (11.)

5.3.1 Yhden LED-lampun mittaukset

Yhden lampun mittauksessa ensimmäisillä vertailulampuilla tehtiin kymmenen mittaus- ta yhtä testattavaa lamppua kohden, loppujen lamppujen osalta mittaus toistettiin neljä kertaa. Mitattaessa yhden lampun käynnistysvirtoja mittauksen suoritusväli oli keskimäärin 20 minuuttia.

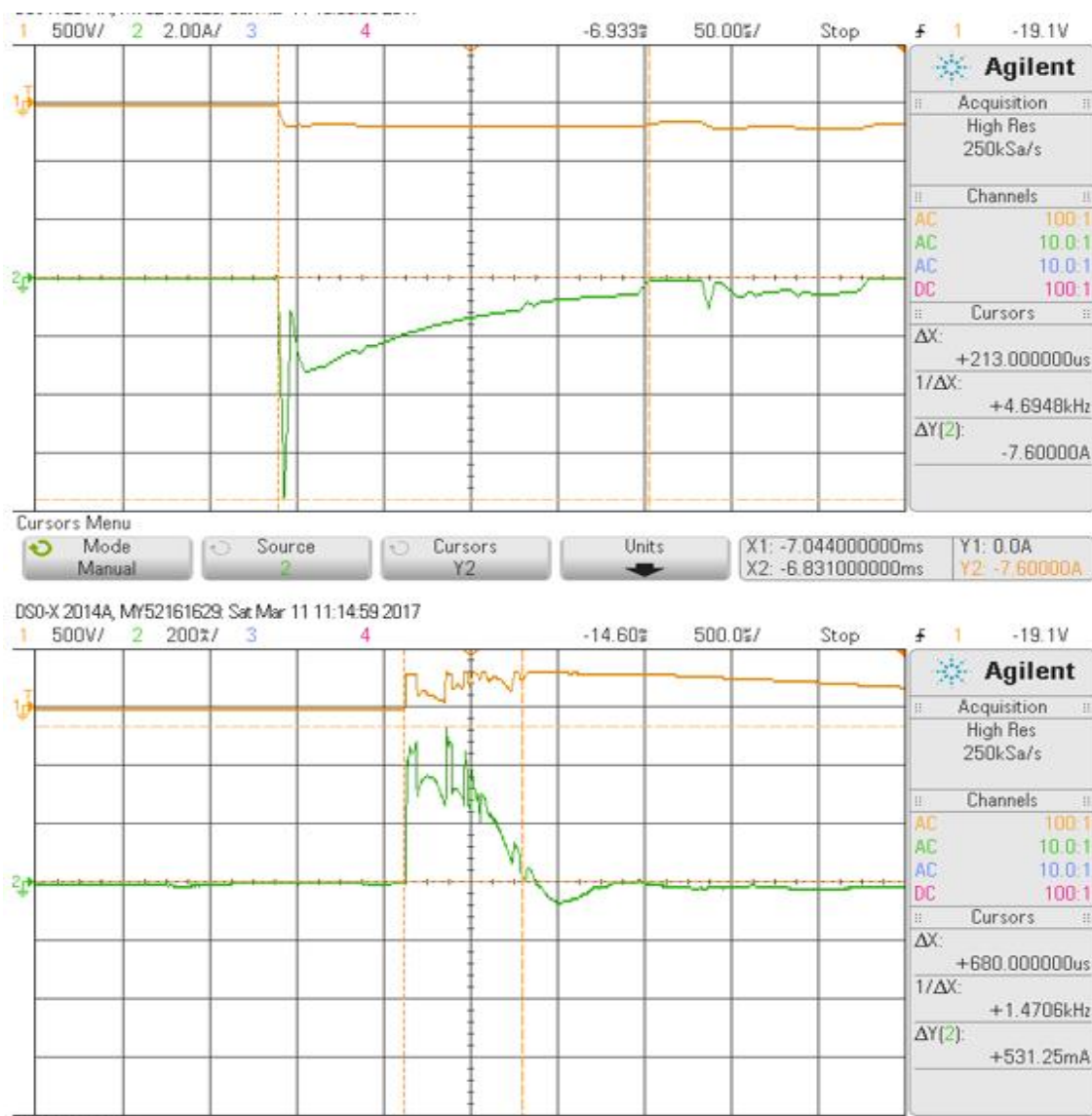
Taulukossa 2 on esitetty käynnistysvirtamittausten tulokset yhdellä testattavalla LED-lampulla. Käynnistysvirran minimi- ja maksimiarvot ovat neljästä testattavasta LED-lampusta mittauksilla saatu pienin ja suurin käynnistysvirta. Käynnistysvirran keskiarvo on kaikkien mittaustulosten keskiarvo. Jokaisen LED-lamppumallin käynnistysvirrat olivat lähes samaa suuruusluokkaa keskiarvon kanssa, vaikka käynnistysvirtojen yksittäisissä minimi- ja maksimiarvoissa olikin suuria eroja.

Taulukko 2. Käynnistysvirtamittaukset yhdellä LED-lampulla.



Lamppumerkistä ja lampun tehosta riippuen mittaustulokset vaihtelivat suuresti. Käynnistysvirtojen oskilloskoopin käyrät olivat myös hankalasti tulkittavia, koska jokainen käynnistystilanne oli erilainen.

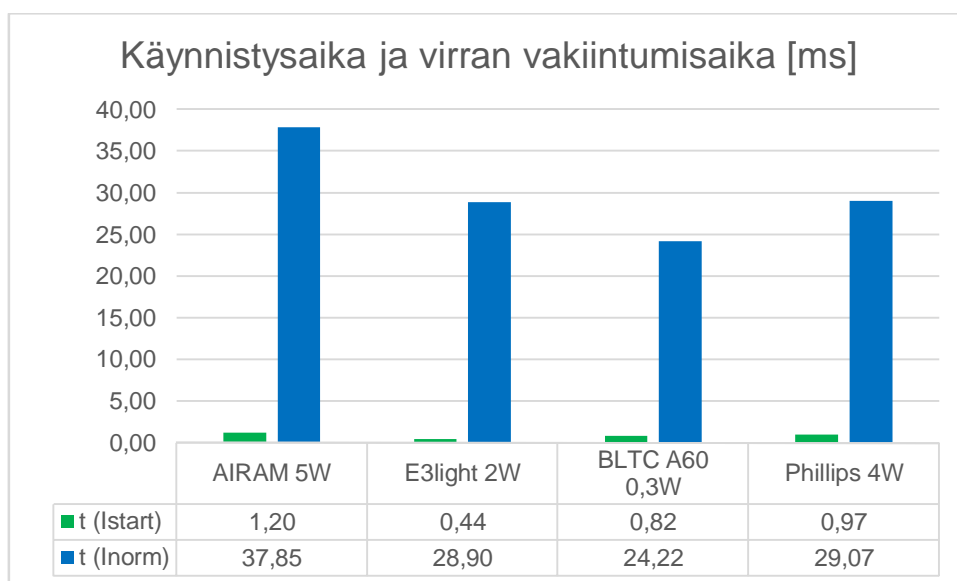
E3light:n 2 W:n ja BLTC:n 0,3 W:n LED-lamput ottivat normaaliin virrankulutukseen verrattuna suhteellisen suuren käynnistysvirran. Airamin 5 W:n käynnistysvirta verrattuna pienitehoisempiin lamppeihin oli maltillinen, ja Philipsin 4 W:n käynnistysvirta pysyi todella pienenä verrattuna muihin LED-lamppuihin. Kuvassa 12 on oskilloskoopilla otetut mittaustulokset E3lightin suurimmasta käynnistysvirrasta sekä Philipsin käynnistysvirrasta.



Kuva 12. Käynnistysvirran mittaukset, ylempi mittaus E3light ja alempi Phillips.

Taulukossa 3 on esitettyä käynnistysvirran kesto aika ja virran tasaantumisajan keskiarvot yhden lampun mittauksissa. Keskiarvot ovat jokaista mallia olevan neljän testilampun mittaustulosten keskiarvo.

Taulukko 3. Yhden LED-lampun käynnistysvirran kesto aika sekä virranvakiintumisaika



LED-lamppujen käynnistysvirtapiikin kesto aika vaihteli n. 10 μ s. 8 ms, mutta minimin ja maksimin mittaustulokset ovat yksittäisiä tuloksia. Keskimääräinen käynnistysvirran kesto aika on noin 400 μ s. 1,2 ms.

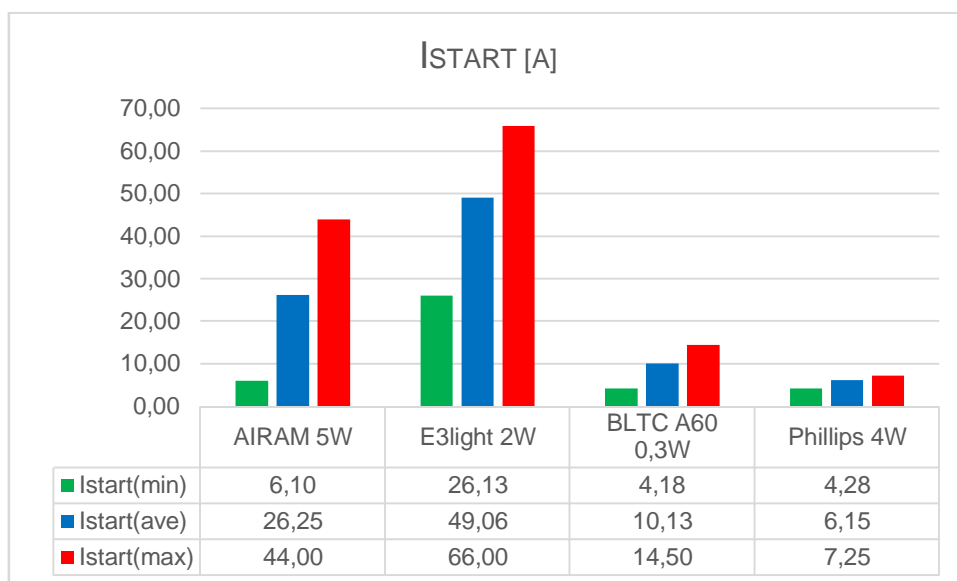
Virran vakiintumisajassa käynnistysvirtapiikistä virran normalisoitumiseen ei ollut mittauksissa suuria eroja. Keskimääräinen virranvakiintumisaika LED-lampuilla on n. 24 ms. 37 ms.

5.3.2 20:n LED-lampun mittaukset

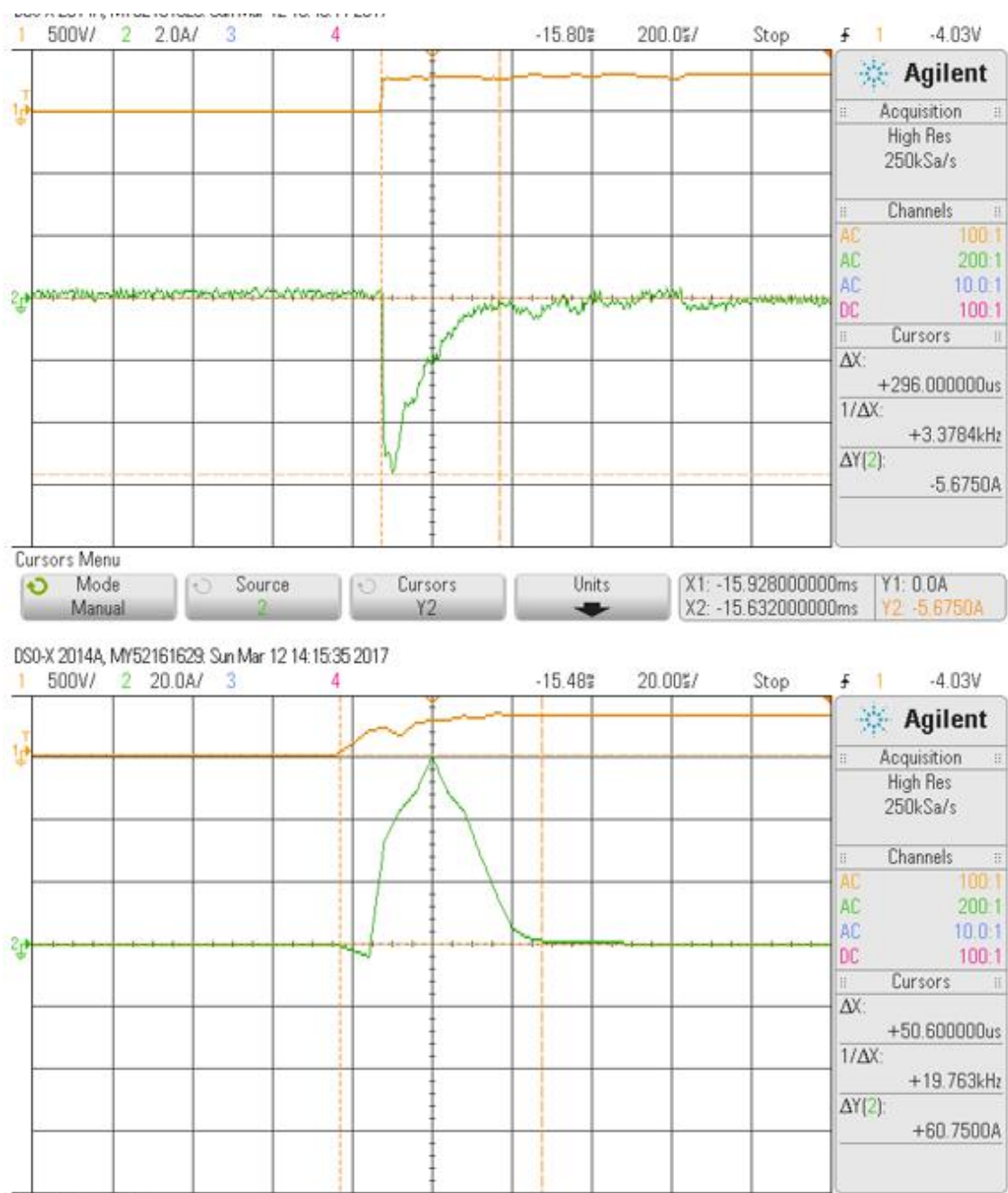
Mittausten suoritusten välinen aika on noin 5 minuuttia 20:llä LED-lampulla. Mittaukset suoritettiin kymmenen kertaa yhtä LED-lampputyyppiä kohden. Ensimmäiset käynnistysvirran mittaukset on suoritettu oskilloskooppiin liitettävällä 200 ampeerin LEM HEME LH240virtapihdillä. LEM HEME LH240-virtapihtiä käytettiin ensimmäisessä mittauksessa, koska useamman LED-lampun käynnistysvirran suuruus oli vaikeasti arvioitavissa. Philipsin ja BLTC:n käynnistysvirran arvot jäivät alhaisiksi, joten näiden lampujen osalta loput mittaukset suoritettiin 20 ampeerin HAMEG HZ56virtapihdillä.

Taulukossa 4 on esitetty käynnistysvirtamittausten tulokset 20:llä testattavalla LED-lampulla. Käynnistysvirran minimi- ja maksimiarvot ovat mittauksilla saatu pienin ja suurin käynnistysvirta. Käynnistysvirran keskiarvo on mittaustulosten keskiarvo.

Taulukko 4. Käynnistysvirtamittaukset 20:n LED-lampun sarjalla.



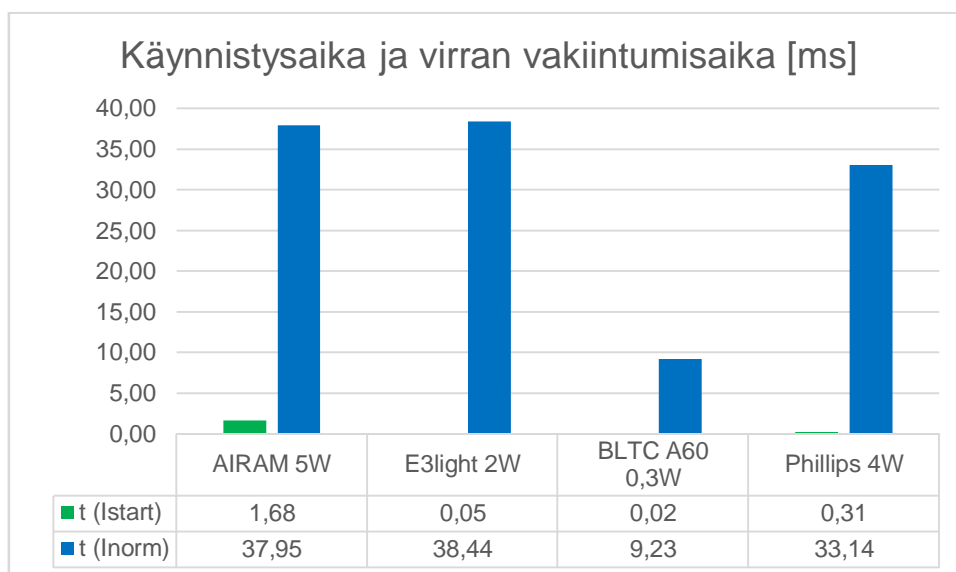
Mittaustulokset vaihtelivat 20:n LED-lampun sarjalla minimi- ja maksimituloksen välillä paljon. Suuremmassa LED-lamppu ryhmässä käynnistysvirtojen mittaustulokset ovat keskiarvoisesti tasaisemmat verrattuna yhden LED-mittaustulosten vaihtelevuuteen, lukuun ottamatta yksittäisiä mittaustuloksia. Kaikkien LED-lamppumallien käynnistysvirran käyrämuodot muuttuivat selkeämmiksi virtapiikeiksi 20:n LED-lampun kuormalla verrattuna yhden LED-lampun kuormaan. Kuvassa 13 näkee Philipsin ja E3lightin 20:n LED-lampun käynnistysvirtapiikit. Lasketun 20 LED-lampun keskiarvoinen käynnistysvirta on lähes 20 kertaa suurempi kuin yhden LED-lampun keskiarvoinen käynnistysvirta. Käynnistysvirran keskiarvon perusteella voi todeta, että käynnistysvirta kertaantuu lamppumäärän mukana.



Kuva 13. 20:n LED-lampun käynnistysvirtapiikki. Ylempi Phillips ja alempi E3light.

Taulukossa 5 on esitettyä käynnistysvirran kesto aika ja virran tasaantumisaian keskiarvot 20:n LED-lampun sarjan mittauksissa.

Taulukko 5. 20:n LED-lampun sarjan käynnistysvirran kesto aika sekä virranvakiintumisaika.



Käynnistysvirtapiikin kesto aika 20:n LED-lampun sarjassa vaihteli noin 13 μ s. 4 ms, mutta minimin ja maksimin mittaustulokset ovat yksittäisiä tuloksia. Keskimääräinen käynnistysvirran kesto aika on noin 20 μ s. 1,7 ms. E3lightin, BLTC:n ja Philipsin käynnistysvirtapiikin keskimääräinen kesto aika aleni huomattavasti yhdellä LED-lampulla tehtyjen mittausten keskiarvoon verrattuna. Airamin LED-lampussa käynnistysvirtapiikin kesto aika hieman kasvoi 20:llä LED-lampulla.

Virran vakiintumisajassa käynnistysvirtapiikistä virran normalisoitumiseen oli jokaisella LED-lamppumallilla hyvin lähellä vakiintumisajan keskiarvoa. Airamin LED-lampussa virranvakiintumisaika pysyi samana verrattuna yhden LED-lampun mittaukseen, E3lightin ja Philipsin keskiarvoinen vakiintumisaika kasvoi, mutta BLTC:n LED-lampussa virranvakiintumisaika laski yli puolella pienemmäksi. Keskimääräinen virranvakiintumisaika on noin 9 ms. 38 ms välillä LED-lamppumallista riippuen.

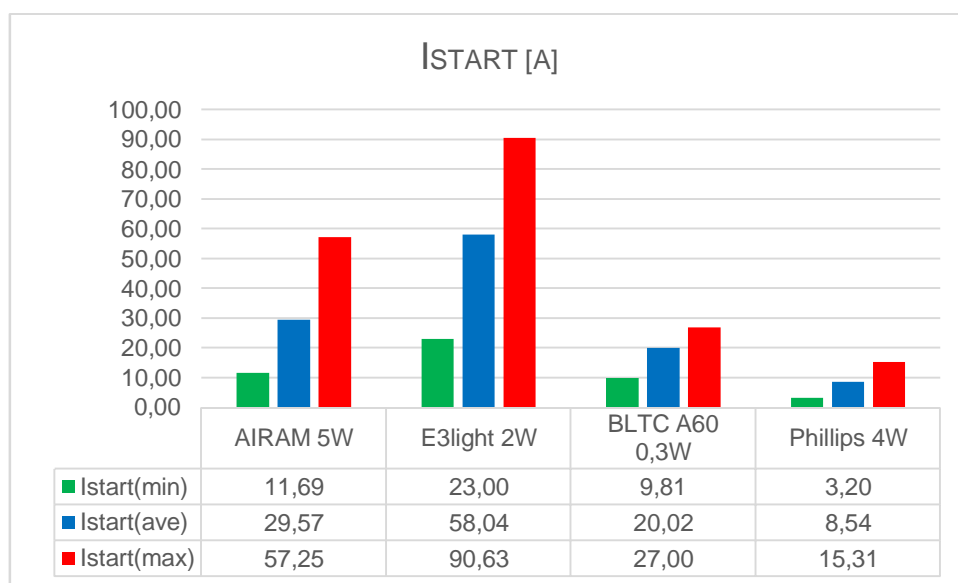
5.3.3 50:n LED-lampun mittaukset

Mittaukset suoritus 50:llä LED-lampulla on toteutettu samalla tavalla, kuin 20:n LED-lampun mittaukset. Mittaus suoritusten välinen aika on noin viiden minuuttia ja mittaukset on suoritettu kymmenen kertaa yhtä lamppumallia kohden, jotta mittausten poikkeavuudet on saatu selville. Ensimmäiset LED-lamppujen mittaukset on tehty 200 ampeerin LEM HEME LH240virtapihdillä, mutta Philipsin alhaisen käynnistysvirtapiikin

vuoksi tämän LED-lampun kohdalla loput mittaukset on tehty 20 ampeerin HAMEG HZ56virtapihdillä.

Taulukossa 6 on esitetty käynnistysvirtamittausten tulokset 50:llä testattavalla LED-lampulla. Käynnistysvirran minimi- ja maksimiarvot ovat mittauksilla saatu pienin ja suurin käynnistysvirta. Käynnistysvirran keskiarvo on mittaustulosten keskiarvo.

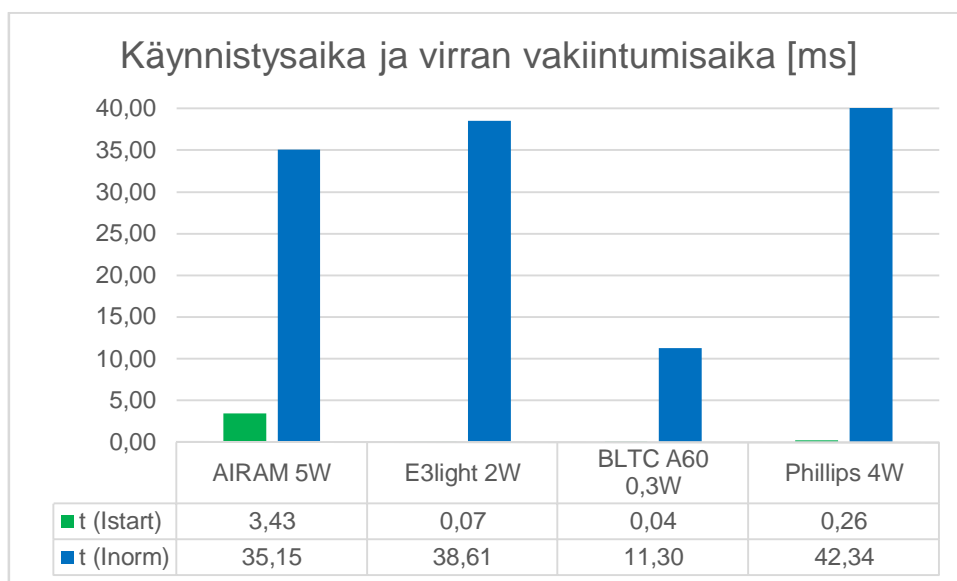
Taulukko 6. Käynnistysvirta mittaukset 50:n LED-lampun sarjalla.



Mittaustulokset vaihtelivat suuresti 50:n LED-lampun sarjalla minimi- ja maksimituloksen välillä. BLTC:n käynnistysvirran keskiarvo pysyi yhtä suurena kuin yhden LED-lampun mittauksissa, mutta muilla LED-lamppumalleilla käynnistysvirran keskiarvo las-
ki suuresti verrattuna yhden LED-lampun keskivertoiseen käynnistysvirtapiikkiin. Kaikil-
la mitattavilla LED-lamppumalleilla käynnistysvirran käyrämuodot pysyivät selkeinä
virtapiikkeinä, kuten 20:n LED-lampun sarjan mittauksissa.

Taulukossa 7 on esitettyä käynnistysvirran kesto aika ja virran tasaantumisa-
jan kes-
kiarvot 20:n LED-lampun sarjan mittauksissa.

Taulukko 7. 50:n LED-lampun sarjan käynnistysvirran kesto aika sekä virran vakiintumisaika



Käynnistysvirtapiikin kesto aika 20:n LED-lampun sarjassa vaihteli noin 20 μ s. 5,7 ms, mutta minimin ja maksimin mittaustulokset ovat yksittäisiä tuloksia. Keskimääräisesti käynnistysvirtapiikin kestoajat olivat hyvin vakiintuneita. Keskimääräinen käynnistysvirran kesto aika on noin 11 μ s. 3,4 ms. Airamien käynnistysvirtapiikin kesto aika kasvoi reilusti verrattuna 20:n LED-lampun sarjaan, mutta muiden LED-lamppumallien kohdalla käynnistysvirtapiikin kesto aika pysyi lähes samana.

Virran vakiintumisajassa käynnistysvirtapiikistä virran normalisoitumiseen oli jokaisella LED-lamppu mallilla hyvin lähellä vakiintumisajan keskiarvoa. Virranvakiintumisajan keskiarvon kesto pysyi samalla tasolla kuin 20:n LED-lampun mittauksessa, mutta Philipsin virran vakiintumisajan keskiarvo kasvoi noin 10 ms. Keskimääräinen virran vakiintumisaika on noin 11 ms. 42 ms välillä LED-lamppumallista riippuen. Kuvassa 14 on Airamien ja BLTC:n virtakäyrä, josta näkee käynnistysvirtapiikin käyttäytymisen virran tasoittumiseen.

Yhden LED-lampun mittauksissa suurin osa mitatuista käynnistysvirtapiikeistä oli laske-
 tun mittausten keskiarvon luokkaa, mutta mittauksissa oli myös satunnaisia selvästi
 alhaisempia ja korkeampia virtapiikkejä. Käynnistysvirran keskiarvoa verrattaessa nor-
 maaliin kulutusvirtaan LED-lamput ottavat huomattavan suuria hetkellisiä virtoja. Airam
 ottaa 53-kertaisen virran, E3light jopa 370-kertaisen virran ja BLTC 137-kertaisen vir-
 ran. Mittauksen toistamisen välisellä ajalla ei ollut vaikutusta mittauksiin, koska täysin
 uuden LED-lampun käynnistysvirran arvot vaihtelivat samankaltaisesti kuin jo mittaus-
 käytössä olleilla LED-lampuilla.

5.4 Sähkötehon mittausta

Sähkötehon mittaukset on suoritettu Fluken 435 3-vaiheisella sähkönlaadun analysaat-
 torilla. Sähkönlaadun analysaattori on 3-vaihdemittaukseen käytettävä mittalaite, mutta
 mittaukset on suoritettu mittaamalla lamput 1-vaiheen ja N-pisteen väliltä. Teho mita-
 taan käyttäen virtapihtimittapäitä mittaamaan menevää sekä palaavaa virtaa sekä mit-
 tapäillä kytkennän yli vaikuttava jännite.

Mittaukset on suoritettu yhdellä LED-lampulla, sekä 20:n ja 50:n LED-lampun ryhmillä.
 Mittausten perusteella yhden LED-lampun tehonmittauksen tulokset ovat epätarkkoja,
 koska lamput ovat pienivirtaisia. Tehokertoimiin ei vaikuta mittaukseen kytkettyjen
 LED-lamppujen lukumäärä. Mittaustulokset ovat tehty 50:n LED-lampun ryhmillä, jonka
 tulokset on jaettu yhden LED-lampun arvoiksi.

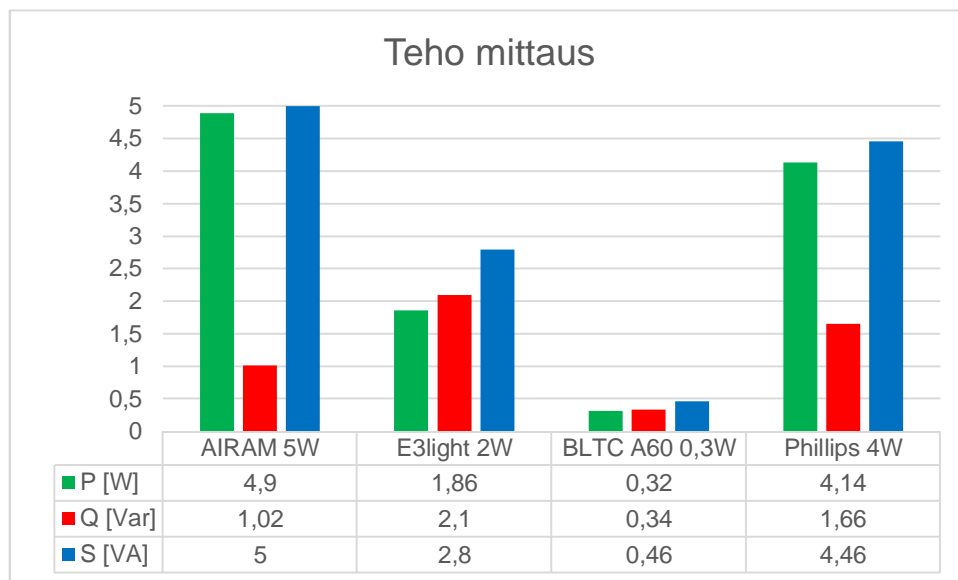
Euroopan komissio asetuksen EU N:o 1194/2012 mukaisesti on asetettu säännöksiä
 LED-lamppujen ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta. Ympäristötelevien ja
 suunnattavien ledilampuille, joissa on käytetty integroitua liitäntälaitetta, on asetettu
 vaatimus tehokertoimen suhteen taulukossa 8. (13.)

Taulukko 8. LED-lamppujen tehokertoimelle PF asetetut raja-arvot.

Teho [W]	Tehokerroin [PF]
≤ 2	Ei vaatimusta
$2 \leq 5$	> 0.4
$5 \leq 25$	> 0.5
> 25	> 0.9

Tehomittauksissa LED-lampun valmistajan antamat pätötehon P-arvot, sekä mitatut arvot olivat samaa luokkaa. Taulukosta 9 voidaan havaita eri LED-lamppumallien tehojen jakautuminen. Airam ja Philipsin LED-lamppujen kuluttama loistehon Q määrät ovat maltilliset verrattuna pätötehoon P, mutta E3lightin ja BLTC:n kulutetun loistehon Q määrä on suurempi kuin pätötehon P.

Taulukko 9. LED-lamppujen tehomittausten tulokset.



LED-lamppujen perustaajuuden (50 Hz) tehokerroin DPF on Airamilla ja Philipsillä todella hyvä, mikä merkitsee LED-lampun näennäistehon ja valoa tuottavan pätötehon suhteen olevan hyvä. E3lightilla ja BLTC:llä perustaajuuden tehokerroin jää hieman alhaisemmaksi, merkitsee LED-lamppujen kuluttavan myös loistehoa. Taulukossa 10 on LED-lamppujen mitatut tehokertoimet perustaajuudella DPF sekä kokonaistehokerroin PF.

Taulukko 10. LED-lamppujen mitatut tehokertoimet.

Lamppun merkki	Airam	e3 light pro	BLTC	Philips
Perustaajuinen tehokerroin $\cos\phi$ [DPF]	0,98	0,66	0,68	0,93
Kokonaistehokerroin [PF]	0,62	0,61	0,52	0,82

LED-lamppujen kokonaistehokertoimet pysyivät EU:n komission asettamissa normeissa. Kokonaistehokerroin koostuu perustaajuisen tehon lisäksi harmonisten yliaaltojen vaikutuksesta. LED-lamppujen kokonaistehokerroin PF arvot ovat pienemmät kuin nii-

den perustaajuinen tehokerroin DPF, joka kertoo LED-lamppujen elektroniikan aiheuttavan harmonisia yliaaltoja.

5.5 Harmonisten ja epäharmonisten yliaaltojen mittaaminen

Sähkönlaatua koskevat mittaukset eli virran ja jännitteen yliaaltojen mittaaminen suoritettiin Fluken 435 3-vaiheisella sähkönlaadun analysaattorilla, joka täyttää yliaaltoja koskevan standardin SFS-EN50160 vaatimukset. Mittaukset suoritettiin yhden vaiheen ja N-pisteen väliltä. Sähkönlaatumittaus tehtiin samalla menetelmällä kuin tehomittaukset, eli käyttäen virtapihtimittapäitä mittaamaan menevää sekä palaavaa virtaa sekä mittapäillä kytkennän yli vaikuttava jännite.

Mittaukset suoritettiin yhdellä LED-lampulla sekä 20:n ja 50:n LED-lampun ryhmillä. Sähkönlaadun mittaukset olivat prosentin tarkkuudella samat riippumatta lamppujen lukumäärästä, joten mittaukseen kytkettyjen LED-lamppujen lukumäärä ei juurikaan vaikuta tulokseen.

Yliaallot ovat sähköverkon perustaajuuden (50 Hz) monikerrannaisia. Harmonisilla yliaalloilla on järjestysluvut, ja ne ovat kokonaislukuarvoja. Yliaallot myös jaetaan kolmeen ryhmään positiiviseen, negatiiviseen ja nolla-komponenttiin. Esimerkki harmonisten yliaaltojen järjestysluvun mukaisen taajuuden ja polaarisuuden muodostuminen on esitetty taulukossa 11. (14.)

Taulukko 11. Yliaaltojen järjestysluvun mukainen taajuus ja polarisuus (14).

Järjestysnumero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Taajuus [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Komponentti	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

LED-lamppujen elektroniikka ja integroidut teholähteet aiheuttavat epälineaarista kuormitusta aiheuttaen verkkojännitteen ja -virran säröytymisen. Elektronisten komponenttien aiheuttamat siniaallosta poikkeavat virrat aiheuttavat syötön impedansseissa jännitehäviöitä, jonka vuoksi jännite säröytyy. Liialliset yliaallot aiheuttavat sähköverkkoon ja sähkökäyttäjille häviöiden kasvua, häiriöille herkkien laitteiden vaurioitumisia ja erityisesti vaaralliset kolmella jaolliset yliaaltovirrat summautuvat vaihejohtimista nollajohtimiin ja näin nollajohtimen virta voi olla jopa 2. 3-kertainen vaihevirtaan nähden.

Virta voi mahdollisesti levitä verkon nollausten kautta esim. rakennusten runkorakenteisiin. (15. s.26, s.30. 32)

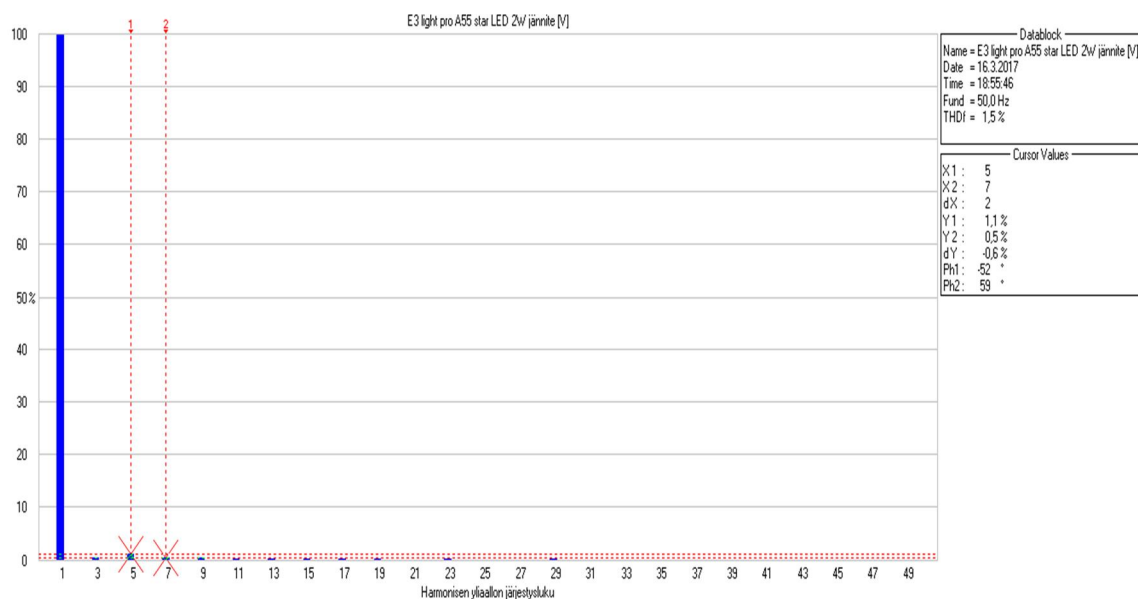
Pienjännitteellä (400V/230V) jännitteen kokonaissärölle THD (Total harmonic distortion) on standardissa SFS-EN 50160 annettu maksimiarvo $THD = 8\%$, mutta käytännössä 3% :n jännitesärö voi aiheuttaa ongelmia laitteiden toiminnassa. Yliaaltovirroille sähkökäyttäjille on annettu referenssivirtaan eli ns. pääsulakkeiden virta-arvoon suositeltavia raja-arvoja, jotka on esitetty taulukossa 12. (15. s.21. 22, s.43. 44)

Taulukko 12. Pienjänniteverkkoon liittyneen sähkökäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittymiskohdasta tarkastettuna. (15 s.44)

Referenssivirta	Suosittelava raja
$\leq 25\text{ A}$	Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita
$> 25\text{ A} - 200\text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10% referenssivirrasta
$> 200\text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8% referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan

Fluke 435 sähkönlaadunanalysaattori mittaa yliaallot järjestysluvultaan 50 harmoniseen yliaaltoon saakka eli 2500 Hz :n tarkkuudella. Mittauksissa on kuitenkin huomioitu vain viisitoista ensimmäistä paritonta yliaaltoa, koska parillisia yliaaltoja ei juurikaan esiinny muuten kuin vika- tai muuten epätavallisissa käyttötilanteissa.

LED-lamppuihin vaikuttavan jännitteiden mittauksissa ei juurikaan esiintynyt huomattavia yliaaltoja, mikä on normaalia. Jännitteiden THD-f eli yliaaltojen kokonaissärö suhteessa perustaajuiseen komponenttiin oli kaikissa lamppumittauksissa $1,4$, $1,8\%$ eli mittaukset pysyivät reilusti vaadittavan 8% :n raja-arvon ja mahdollisesti ongelmia aiheuttavan 3% :n alapuolella.



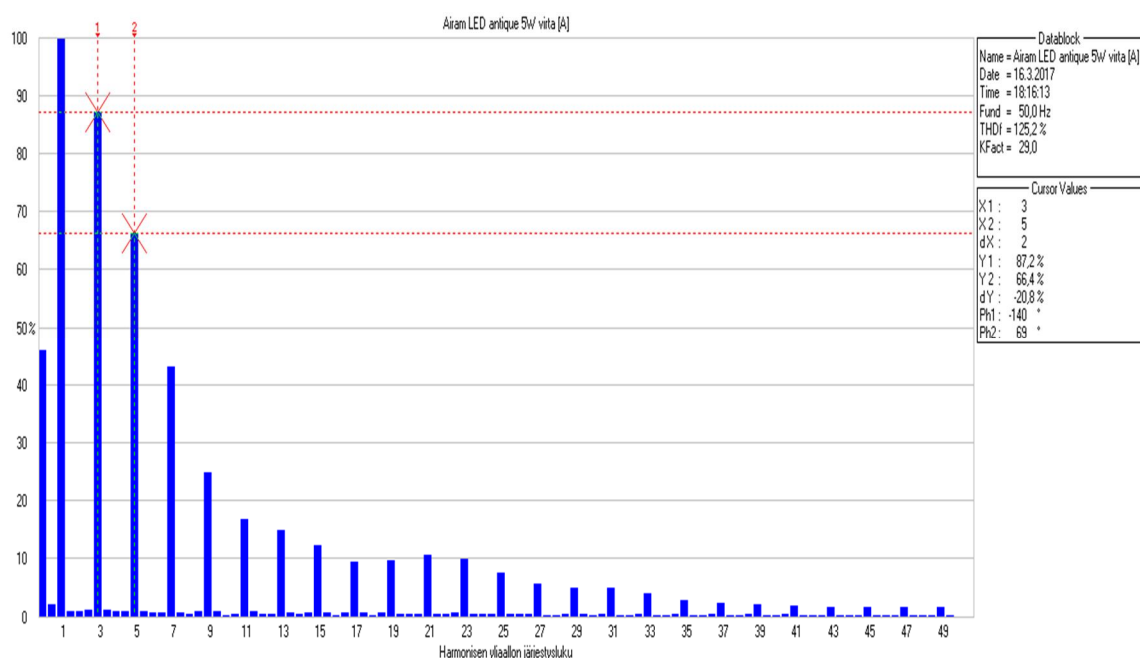
Kuva 15. E3 light pro A55 star LED 2 W jännitemittauksen yliaallot.

Kuvassa 15 on Fluke 345 sähkönlaadunanalysaattorin tallentama E3lightin 2W:n LED-lampun harmonisten jännitteiden kaavio sekä taulukossa 13 jokaisen mitattavan lampun jännitteiden yliaallot yhden, 20:n ja 50 lampun sarjalla järjestysnumeroon 15 saakka.

Taulukko 13. Mitattujen LED-lamppujen yliaaltojännitteet.

	Airam			e3 light pro			BLTC			Philips		
	1kpl	20kpl	50kpl	1kpl	20kpl	50kpl	1kpl	20kpl	50kpl	1kpl	20kpl	50kpl
THD%f	1,5	1,6	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
H3%f	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
H5%f	1,1	1,3	1,4	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,3	1,1	1,1
H7%f	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
H9%f	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
H11%f	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
H13%f	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
H15%f	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

LED-lamppujen virran yliaaltomittauksessa harmonisten yliaaltojen määrä on suuri. LED-lamppujen kokonaissärö THD-f on yhdellä Airamin 5 W:n filamenttitekniikalla toimivalla lampulla jopa 124 % ja muilla LED-lampuilla noin 40. 80 %. Vaarallisia N-johtimeen summautuvia eli järjestysluvulta kolmella jaollisia yliaaltoja eli 3-, 9- ja 15-yliaaltoja esiintyi huomattavasti.



Kuva 16. Airam LED antique 5 W virtamittauksen yliaallot.

Kuvassa 16 on Fluke 345 sähkönlaadunanalysaattorin tallentama suurimman virran kokonaissärö THD-f omaavan Airam LED antique 5 W:n LED-lampun harmonisten virtojen kaavio, sekä taulukossa 14 jokaisen mitattavan lampun virtojen yliaallot yhden, 20:n ja 50 lampun sarjalla järjestysnumeroon 15 saakka.

Taulukko 14. Mitattujen LED-lamppujen yliaaltovirrat.

	Airam			e3 light pro			BLTC			Philips		
	1kpl	20kpl	50kpl	1kpl	20kpl	50kpl	1kpl	20kpl	50kpl	1kpl	20kpl	50kpl
THD%f	124,2	123,7	119,7	40,0	39,9	40,1	79,7	80,7	80,1	54,7	54,7	52,7
H3%f	86,9	87,3	86,7	28,9	29,2	29,4	64,8	66,9	67,0	42,8	42,2	42,1
H5%f	66,0	66,0	64,4	16,0	15,1	15,1	34,4	36,0	35,5	27,3	27,2	25,8
H7%f	42,7	42,5	40,0	9,5	9,3	9,4	18,5	19,6	18,9	14,9	14,8	13,4
H9%f	24,4	24,1	21,4	10,1	9,9	9,8	9,0	9,5	9,0	12,0	12,5	10,5
H11%f	16,8	16,3	14,3	6,5	6,8	7,1	4,2	3,9	3,4	6,9	7,7	5,7
H13%f	15,0	14,3	12,9	8,0	7,6	7,7	2,0	1,3	1,6	3,7	4,6	2,9
H15%f	12,2	11,2	9,5	5,2	4,9	5,1	3,7	3,5	3,9	2,6	2,2	0,8

Mitatuissa LED-lampuissa esiintyy harmonisia yliaaltojännitteitä ja erityisesti yliaaltovirtoja, koska lamput koostuvat elektroniikasta. LED-lamppujen elektroniikka aiheuttaa epälineaarista kuormitusta, jolloin epälineaarinen virta aiheuttaa LED-lamppuja syöttävässä piirissä jännitehäviöitä ja näin syntyy yliaaltovirtoja ja -jännitteitä. Erityisen huolestuttavia on suuret 0-polarisaation omaavat ylivirrat eli järjestysluvultaan 3 jaolliset yliaaltovirrat. Esimerkiksi Airam LED-lampussa 3-yliaallon osuus perustaajuisesta 50 Hz virrasta on noin 87 %. Mittaukset suoritettiin kuitenkin suoraan mitattavista LED-

lamppuista, jonka vuoksi tulokset ovat näin suuria. Yleisesti harmoniset yliaallot mitataan läheltä sähköverkon syöttöpistettä esimerkiksi sähköliittymän pääkeskuksesta tai sähköverkon muuntajan PJ-puolen (pienoisjännite 400 V) pääkeskuksesta, jolloin LED-lamppujen mittauksessa vaikuttavat myös syötön impedanssit.

6 LED-valaistuksen kuormituksen suunnittelu

LED-lamppujen käyttö aiheuttaa käynnistystilanteissa hetkellisiä käynnistysvirtapiikkejä. Tämän vuoksi on myös syytä tarkastella valaistukseen suunnitteluun liittyviä kuormituksia sekä suojalaitteita.

Mittauksissa todettiin, että LED-lampun käynnistystilanteessa mitattavat lamput ottivat moninkertaisia käynnistysvirtoja verrattuna lamppujen normaaliin käyttövirtaan. Käynnistysvirta koostuu hetkellisestä kytkentäpiikistä sekä kytkentävirran vakiintumiseen kuluvasta ajasta. Nämä kytkentähetkenä tapahtuvat virtapiikit voivat vaikuttaa johdon-suoja-automaatteihin, joita nykyisin yleisesti käytetään suojaamaan sähköryhmiä.

Johdonsuoja-automaatti on kaksitoiminen sähköryhmien suojalaite, jonka tarkoitus on suojata sähköryhmää syöttävää piiriä ylikuormitus- sekä oikosulkutilanteilta. Termisellä suojauksella toteutetaan hidas ylikuormitussuojaus, joka katkaisee syöttöpiirin mahdollisen ylivirran ja sen vaikuttavan ajan mukaisesti. Magneettinen laukaisu on nopea oikosulkutilanteissa tapahtuva syöttöpiirin katkaisu, joka laukeaa välittömästi, kun piirissä havaitaan korkea virtapiikki.

Johdonsuoja-automaatteja valmistavia yrityksiä on monia, mutta ABB:n S200-sarjan johdonsuoja-automaateista löytyi internetistä kattavimmat tekniset tiedot. Laitevalmistajasta riippumatta kaikki johdonsuoja-automaatit toimivat samalla tavalla, joten kuormituslaskennat on suoritettu ABB:n S200-sarjan teknisten tietojen perusteella.

6.1 Magneettinen pikalaukaisu

LED-lamppujen käynnistystilanteissa tapahtuva lyhytkestoinen virtapiikki voi johdonsuoja-automaatissa laukaista magneettisen pikalaukaisun.

Laskutoimituksissa on käytetty LED-lamppujen käynnistysvirran ja käynnistysvirtapiikin kestoajan mittaustuloksia. Mittaustuloksista on laskennoissa huomioitu jokaisen yhden LED-lampun tyypin mittauksista saatu suurin käynnistysvirta sekä suurin käynnistysvirtapiikin kesto aika, jotta saadaan kuormitus laskettua huonoimman mahdollisen tilanteen mukaan.

Johdonsuoja-automaatin magneettisen pikalaukaisun mukainen LED-lamppujen maksimilukumäärä lasketaan yhtälön 1 mukaisesti.

$$n = \frac{I_n \times I_{PITO} \times K}{I_{START}} \quad (1)$$

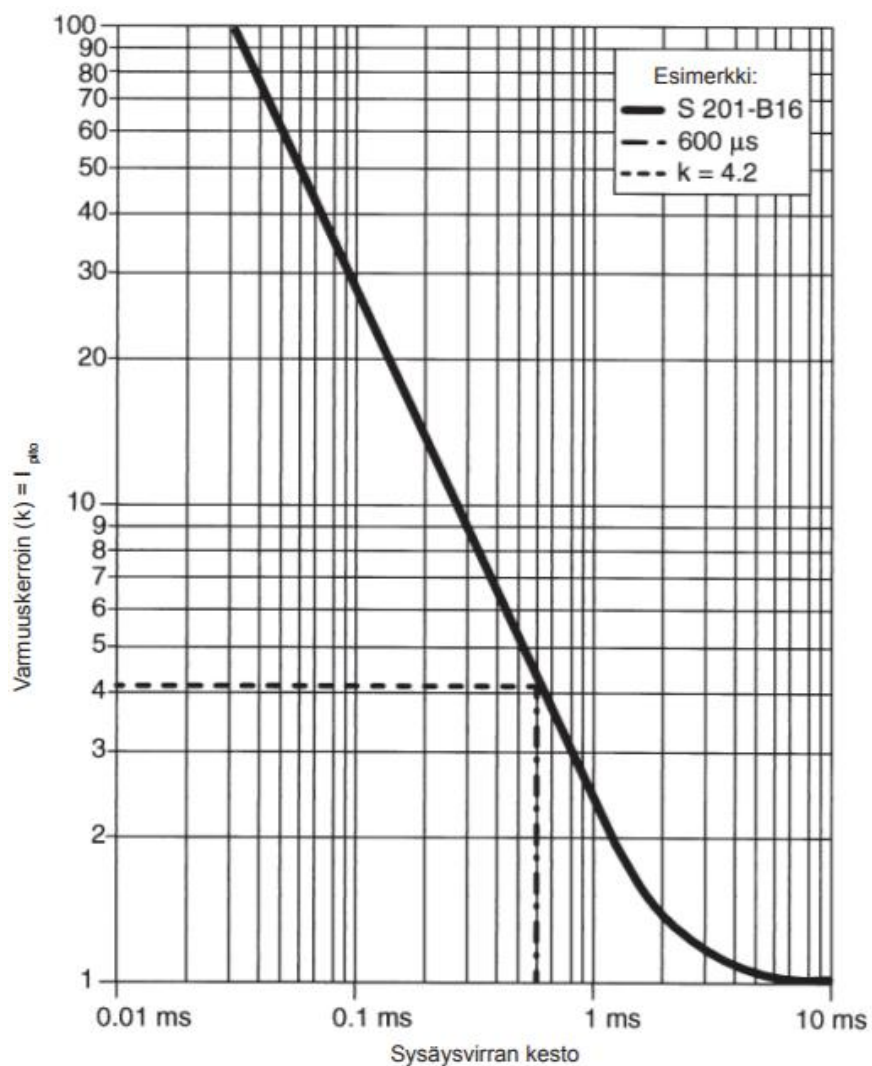
Yhtälössä 1 X kertoo lamppujen lukumäärän, I_n on johdonsuoja-automaatin nimellisvirta, K_{PITO} on johdonsuoja-automaatin laukaisukäyrän mukainen pitovirtakerroin, K on alle 10 ms kestoisen virtapiikin korjauskerroin ja I_{START} mittauksista saatu suurin käynnistysvirta.

Johdonsuoja-automaatin laukaisukäyrän mukainen pitovirtakerroin K_{PITO} saadaan ABB:n S200:n teknisistä tiedoista, jotka ilmenevät kuvasta 17. Sysäysvirran korjauskerroin K saadaan ABB:n teknisistä tiedoista saadusta taulukosta kuvasta 18.

Laukaisukäyrät

standardi	laukaisukäyrä ja nimellisvirta		Terminen laukaisu ²⁾			Magneettinen laukaisu ¹⁾		
			koestusvirrat: pitorajavirta	laukaisu- rajavirta	laukaisu- aika	koestusvirrat: pitorajavirta	laukaisu- rajavirta	laukaisu- aika
DIN VDE 0641/T 11	B	6 ... 63 A	$1.13 \cdot I_n$	$1.45 \cdot I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$3 \cdot I_n$	$5 \cdot I_n$	$> 0.1 \text{ s}$ $< 0.1 \text{ s}$
	C	0.5 ... 63 A	$1.13 \cdot I_n$	$1.45 \cdot I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$5 \cdot I_n$	$10 \cdot I_n$	$> 0.1 \text{ s}$ $< 0.1 \text{ s}$
	D	0.5 ... 63 A	$1.13 \cdot I_n$	$1.45 \cdot I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$10 \cdot I_n$	$20 \cdot I_n$	$> 0.1 \text{ s}$ $< 0.1 \text{ s}$
DIN VDE 0660/9.82	K	0.5 ... 63 A	$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	-		
DIN VDE 0660 8/69 Osa 1 ⁴⁾			$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$ $1.5 \cdot I_n$ $6.0 \cdot I_n$	$> 2 \text{ h}$ $< 2 \text{ h}$ ³⁾ $< 2 \text{ min.}$ ³⁾ $> 2 \text{ s (T1)}$	$8 \cdot I_n$	$12 \cdot I_n$	$> 0.2 \text{ s}$ $< 0.2 \text{ s}$
DIN VDE 0660/9.82	Z	0.5 ... 63 A	$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	-		
DIN VDE 0660 8/69 Osa 1 ⁴⁾			$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$ $1.5 \cdot I_n$ $6.0 \cdot I_n$	$> 2 \text{ h}$ $< 2 \text{ h}$ ³⁾ $< 2 \text{ min.}$ ³⁾ $> 2 \text{ s (T1)}$	$2 \cdot I_n$	$3 \cdot I_n$	$> 0.2 \text{ s}$ $< 0.2 \text{ s}$

Kuva 17. ABB S200:n johdonsuoja-automaatin laukaisukäyrät (16; s.9).



Kuva 18. ABB S200:n johdonsuoja-automaatin laukaisu sysäysvirralla (16; s.12).

Käynnistysvirran ja käynnistysvirtapiikin mittauksissa on jokaisesta lampputyypistä ollut mukana neljä vertailulamppua, joille on mittaus toistettu useita kertoja. Taulukossa 15 on mittauksista saadun suurimman käynnistysvirran ja pisimmän käynnistysvirtapiikin kestoajan mukaan laskettu johdonsuoja-automaatin käynnistystilanteen maksimikuormitus eri laukaisukäyrillä mittauksessa käytetyillä LED-lampuilla.

Taulukko 15. Mittausten maksimiarvoilla laskettu johdonsuoja-automaattien kuormitus käynnistystilanteessa.

	Airam LED antique 5W	E3light pro 2W	BLTC A60 0,3W	Phillips LEDluster 4W
B 6	7	2	16	18
B 10	11	4	27	31
B 16	18	7	43	49
C 6	11	4	27	31
C 10	19	7	44	51
C 16	30	11	71	82
D 6	23	8	53	61
D 10	38	14	89	102
D 16	60	22	142	163

Taulukossa 15 lasketut johdonsuoja-automaattien käynnistystilanteiden kuormitukset on laskettu mittauksista saaduilla ääriarvoilla, joten lisäksi on myös laskettu yhden LED-lampun mittauksista saatujen tulosten keskiarvon mukaan toinen kuormitustaulukko. Keskiarvojen perusteella laadittu kuormitustaulukko 16 on laskettu, koska maksimiarvojen mukaan laaditussa taulukossa ääriarvot ovat vain yksittäisiä ja keskiarvosta suuresti poikkeavia arvoja.

Taulukko 16. Mittausten keskiarvoilla laskettu johdonsuoja-automaattien kuormitus käynnistystilanteessa.

	Airam LED antique 5W	E3light pro 2W	BLTC A60 0,3W	Phillips LEDluster 4W
B 6	21	20	120	115
B 10	35	33	199	192
B 16	56	53	319	308
C 6	35	33	199	192
C 10	58	55	332	320
C 16	93	88	531	513
D 6	70	66	398	385
D 10	117	110	664	641
D 16	187	177	1062	1025

Tarkan LED-lampun käynnistysvirran mittaaminen on hankalaa, koska käynnistystilanteessa siihen vaikuttaa monta eri tekijää, minkä vuoksi tarkan käynnistystilanteiden kuormituksen laskeminen on myös vaikeaa.

Laskettujen johdonsuoja-automaattien maksimi- ja keskiarvojen perusteella käynnistystilanteen kuormitustaulukoita verrattaessa selviää, että maksimiarvojen perusteella lasketut kuormitukset ovat todella alhaiset verrattuna keskiarvon mukaan laskettuihin kuormituksiin. Käynnistysvirtamittaukset suoritettiin 20:n ja 50:n LED-lampun ryhmillä, ja mittaustulosten perusteella isoissa LED-lamppuryhmissä käynnistysvirta on yhtä lampua kohden suuruusluokaltaan sama kuin keskiarvo yhden lampun käynnistysvirtamittauksissa.

LED-lampun käynnistysvirran mukaan tehtävissä kuormituksissa on realistisempaa käyttää käynnistysvirran ja käynnistysvirran kestoajan keskiarvon mukaan laskettua kuormitustaulukkoa.

6.2 Terminen ylikuormitussuojaus

Johdonsuoja-automaatin termien ylikuormitussuojaus toteutetaan siten, että suojalaitteen maksimikuorma on johdonsuoja-automaatin nimellisvirtaa vastaava maksimiteho.

Laskutoimituksissa on käytetty LED-lamppujen oskilloskoopilla tehtyjen vakiovirran mittausten tuloksia. Mittaustuloksista on laskennoissa huomioitu jokaisen yhden LED-lampun mittauksista saatu virran tehollisarvon keskiarvoa.

Johdonsuoja-automaatin termisen ylikuormitus suojauksen mukainen LED-lamppujen maksimi lukumäärä lasketaan yhtälön 2 mukaisesti.

$$n = \frac{I_n}{I_{rms}} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 X kertoo lamppujen lukumäärän, I_n on johdonsuoja-automaatin nimellisvirta ja I_{rms} yhden LED-lampun tehollisen virran keskiarvo. Taulukossa 17 on laskettuna jokaisen LED-lampun maksimimäärä eri nimellisvirralla olevilla johdonsuoja-automaateilla.

Taulukko 17. LED-lamppujen maksimimäärä johdonsuoja-automaattien termisessä suojauksessa.

	Airam LED antique 5W	E3light pro 2W	BLTC A60 0,3W	Phillips LEDluster 4W
6A	170	352	1846	274
10A	283	587	3077	456
16A	453	940	4923	730

Johdonsuoja-automaattien termisen ylivirtakuormituksen maksimikuormat ovat LED-lamppujen lukumäärältä todella suuret, koska LED-lamppujen sähköteho on niin pieni. Matala sähköteho tarkoittaa, että LED-lampun ottama käyttövirta on myös todella alhainen.

Magneettista pikalaukaisua ja termistä ylikuormitusta vertaillen LED-lamppujen suojauksessa tulee johdonsuoja-automaatin kuormituksen maksimimäärä suunnitella magneettisen pikalaukaisun mukaisesti. Käynnistysvirtapiikin aiheuttama magneettinen pikalaukaisu toimii huomattavasti vähäisemmällä LED-lamppujen määrällä kuin termisen ylikuormitus.

7 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin LED-lamppujen vaikutusta sähköverkkoon. Tutkimukset suoritettiin neljällä erilaisella LED-lampulla ja jokaisen lampputyypin kohdalla myös verkostovaikutukset tarkastettiin 20:n ja 50:n LED-lampun ryhmään kytkennällä. Tutkimusten tarkoituksena oli saada selville, kuinka LED-lamput käyttäytyvät kytkentä- sekä käyntitilassa.

Mittalaitteina toimi oskilloskooppi sekä sähkönlaadunanalysaattori, joilla sai tallennettua tarkasti mittaustulokset. Suoritettuja mittauksia olivat käynnistysvirran virran käyrämuodon, teho- sekä yliaaltomittaukset. Käynnistysvirtamittauksista selvisi, että LED-lamppujen käynnistysvirta on monikymmenkertainen verrattuna normaaliin käyttövirtaan, mutta tarkan arvon määrittäminen on hankalaa, koska siihen vaikuttaa syöttävän verkon impedanssi sekä kytkentähetken ajanjakso. LED-lamppujen virran käyrämuodoissa on eroa, ja ne ovat todella epäsymmetriset normaaliin virran siniaaltoon verrattuna. Virran käyrämuodon epäsymmetrisyys johtuu LED-lampun teholähteeseen integroidusta elektroniikasta. Epäsymmetrisyys ilmenee myös tehomittauksista ja selviää, että lamppujen kuluttama teho sisältää myös loistehoa. Harmonisia yliaaltoja LED-lampuissa esiintyy myös paljon. Jännitteen yliaallot ovat maltillisia, mutta virrassa yliaaltoja esiintyy paljon, myös erityisesti 3-jaollisia ongelmallisia yliaaltoja.

Mittaustuloksien perusteella pystyttiin määrittelemään kuormitustaulukot, joita tullaan käyttämään esimerkkinä, kun huvipuistoon suunnitellaan kappalemäärältä suuria valaistusryhmiä. Huomiota herätti myös LED-lamppujen suuri virran yliaaltoisuus sekä kuorman kuluttaman tehon jännitteen ja virran välisen suhteen epälineaarisuus. Huvipuistoissa sekä muissa suuren määrän LED-valaistusta omaavissa kohteissa tulisikin ottaa huomioon harmoniset yliaallot sekä epäsymmetrinen kuormitus ja seurata näitä säännöllisesti sähkönlaadun analysoinnilla. Tarvittaessa myös tulee harkita kuorman epälineaarisuuden kompensoimista tai virran haitallisten yliaaltojen suodattamista.

Lähteet

- 1 LED-valaistuksen tulevaisuus. Verkkoaineisto. Premium Light. www.premiumlight.eu/index.php?page=led-the-lightning-future-7. Luettu 25.2.2016.
- 2 Valaistustietoutta. Verkkoaineisto. Fagerhult Oy. www.fagerhult.com/fi/valaistustietoutta/LED/. Luettu 25.2.2016.
- 3 LED-koulu. Verkkoaineisto. OEM Finland Oy: Hide-a-lite. www.hidealite.fi/LED-koulu/2141102.html. Luettu 25.2.2016.
- 4 Katajisto, Tony. 2015. LED-lamppujen vaikutukset sähkön laatuun. Opinnäyetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95000/Katajisto_Tony.pdf?sequence=1. Luettu 27.2.2016.
- 5 LED-perustietoa. Verkkoaineisto. Osram GmbH. http://www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/perustietoa/index.jsp. Luettu 27.2.2016.
- 6 The History Of LEDs And LED Technology. Verkkoaineisto. MarkTech Optoelectronics. <http://www.marktechopto.com/the-history-of-leds-and-led-technology.cfm>. Luettu 3.3.2016.
- 7 Shuji Nakamura - Short Bio. Verkkoaineisto. University of California. <http://ssleec.ucsb.edu/nakamura>. Luettu 6.3.2016.
- 8 Sippola, Vesa. 2010. Eco-desing-direktiivin täytäntöönpanopiteiden vuoksi poistuvien lamppujen korvaaminen ulkovalaistuksessa. Diplomityö. Aalto Yliopisto. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100148.pdf>. Luettu 9.3.2016.
- 9 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2017/1369. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/49151917-7365-11e7-b2f2-01aa75ed71a1/language-fi/format-PDFA1A>. Luettu 9.3.2016.
- 10 The Next Generation of LED Filament Bulbs. Verkkoaineisto. LED inside of Trend Force Corp. http://www.ledinside.com/knowledge/2015/2/the_next_generation_of_led_filament_bulbs. Luettu 28.3.2016.
- 11 The Next Generation of LED Filament Bulbs. Verkkoaineisto. LED inside of Trend Force Corp. http://www.ledinside.com/knowledge/2015/2/the_next_generation_of_led_filament_bulbs. Luettu 28.3.2016.

- 12 LED Driver Inrush Currents. Verkkoaineisto. Advanced Lightning Technologies Australia Inc. <https://adlt.com.au/technology/%EF%BB%BFled-driver-inrush-currents/>. Luettu 21.3.2017
- 13 Komission asetus (EU) N:o 1194/2012. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R1194&from=EN>. Luettu 21.3.2017.
- 14 Korpinen, Leena 2008. Yliaalto-opus. Verkkoaineisto. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>. Luettu 27.9.2017.
- 15 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Sähköinfo Oy. Luettu 26.9.2017
- 16 Pienjännitekojeet. Verkkoaineisto. ABB Oy. <https://library.e.abb.com/public/6b2e3b61cdc65b49c2256e7e0026aeb4/1SCC400004C1801.pdf>. Luettu 24.10.2017
- 17 Lasten Päivän Säätiö. Verkkoaineisto. Lasten Päivän säätiö sr. <https://www.linnanmaki.fi/fi/lasten-paivan-saatio/>. Luettu 8.3.2018